104-06738/

Acknowledgments

This publication has been prepared for:

Public Safety and Emergency Preparedness Canada

340 Laurier Avenue West, 12th Floor
Ottawa, Ontario K1A 0P8
Tel: (613) 994-4875
Toll Free: 1-800-830-3118
Fax: (613) 998-9589
Email: communications@psepc-sppcc.gc.ca
Internet: www.psepc-sppcc.gc.ca

Author:

Jacques Locat
Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN)
Groupe de recherche en géo-ingénierie et en environnement (GREGI)
Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, G1K 7P4
Tel: (418) 656-2179, Fax: (418) 656-7339
Email: locat@ggl.ulaval.ca

This material is based upon work supported by the Division of Research and Development (DRD) in the Office of Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparedness (OCIPEP), under Contract Reference No. 2003D011. On 12 December 2003, the Office of Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparedness was integrated into a new department, Public Safety and Emergency Preparedness Canada (PSEPC). Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of Public Safety and Emergency Preparedness Canada.

© HER MAJESTY THE QUEEN IN RIGHT OF CANADA (2004)
Catalogue No.: PS48-4/2004E-PDF
ISBN: 0-662-36748-0

Executive Summary

In July 1996, an exceptional climatic event left more than 200 mm of rain in the Saguenay–Lac-Saint-Jean region and had devastating effects on the people of that region as well as on the terrestrial infrastructures. Another devastating effect was the accumulation of more than 20 million tonnes of sediments in the upstream portion of the Saguenay Fjord, of which a good part came from the avulsion of the Ha! Ha! River and the intensive erosion of other major tributaries of the Saguenay Fjord region. Not long after the flood, a research team was assembled to evaluate the potentially positive impact of that disaster; the new layer of sediments had covered contaminated sediments that lie at the bottom of the fjord. This team initiated the study, *Efficiency of the catastrophic capping layer of July 1996 in acting as a barrier against contaminated sediments: an opportunity for technological advancement.*

The scientific results obtained from numerous research projects have been published as articles in many research journals or disclosed during conferences. The synopses of the symposium on the Saguenay flood, a symposium held at the onset of the project and in which OCIPEP[1] participated, are available on the Internet[2]. The last scheduled activity related to the Saguenay post-flood took place during the 2nd International Symposium on Contaminated Sediments that was held in Québec City in May 2003. This report outlines the results obtained from the special session on the Saguenay post-flood and emphasizes the various contributions and conclusions drawn from the research projects. These results will also be analyzed in light of OCIPEP's concerns.

Conclusions drawn from the various research projects include:

1. That it is possible to rapidly deploy research teams in order to estimate the effect of natural disasters on the marine environment and shoreline communities. This is due to the development and pooling of tools in the domains of chemistry, biology, geotechnics, and geophysics.

2. The layer resulting from the 1996 flood, although unevenly distributed, acted as an efficient protection layer against the migration of contaminants found in underlying sediments.

3. The repercussion of the flood on the benthic fauna has been beneficial in providing a protection layer limiting the access of these organisms to the contaminants. In the long term, this should help reduce the level of contaminants in the food chain of the animals that feed on the benthic fauna.

4. The coastal damage is limited to the areas close to river deltas.

---

[1] On 12 December 2003, the Office of Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparedness (OCIPEP) was integrated into a new department, Public Safety and Emergency Preparedness Canada (PSEPC).

[2] www.ocipep.gc.ca/research/resactivites/natHaz/saguenay/1998_D001_e.asp

The local and regional infrastructures associated with the use and exploitation of the fjord's aquatic environment after the 1996 flood are finding conditions even more favourable in terms of water quality as well as benthic fauna.

Table of Contents

Acknowledgments ii

Executive Summary iii

1.0 Introduction 1

2.0 Scientific Objectives of the Saguenay Post-flood Project 3

3.0 Scientific Results Disclosed during the Special Session 3

3.1 Oral Presentations 3
3.2 Poster Session 5
3.3 Other Scientific Documents 5

4.0 Scientific Benefits of Research 5

4.1 Considerations of the Marine and Coastal Effects of the July 1996 Flood 6
4.1.1 Marine Environment 6
4.1.2 Coastal Environment 7
4.1.3 Landslides Hazard 7

5.0 Conclusion on the Marine and Coastal Effects of the Saguenay Flood 10

5.1 Effects on the Marine and Coastal Environments 10
5.2 Future Research Priorities in the Saguenay Region 10

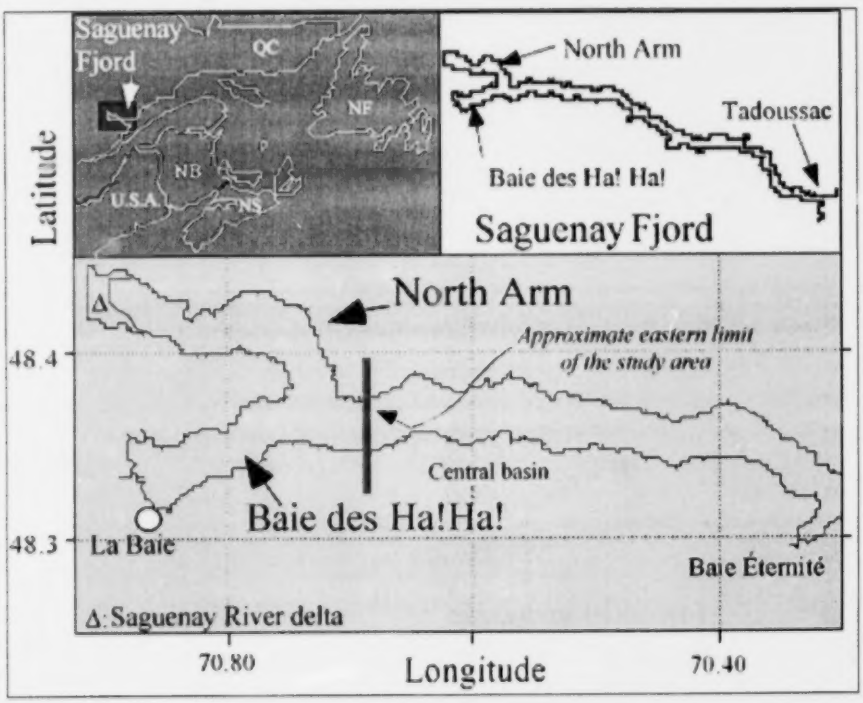
Bibliography 12

Appendix A – Abstracts for the Special Session on the Saguenay Post-flood Project .. A-1

1.0 Introduction

In July 1996, an exceptional climatic event left more than 200 mm of rain in the Saguenay–Lac-Saint-Jean region and had devastating effects on the people of that region as well as on the terrestrial infrastructures. Another devastating effect was the accumulation of more than 20 million tonnes of sediments in the upstream portion of the Saguenay Fjord, of which a good part came from the avulsion of the Ha! Ha! River and the intensive erosion of other major tributaries of the Saguenay Fjord region (Figure 1). This catastrophic event is referred to hereafter as the Saguenay flood, and the resulting catastrophic layer is called the flood layer. This layer is approximately 20 cm thick, but it gets as thick as 5 m at the mouth of the main rivers. The extent of this layer is highlighted in Figure 2 by the dark areas that appeared in 1997.

Figure 1 View of the study area in the upstream portion of the Saguenay Fjord.

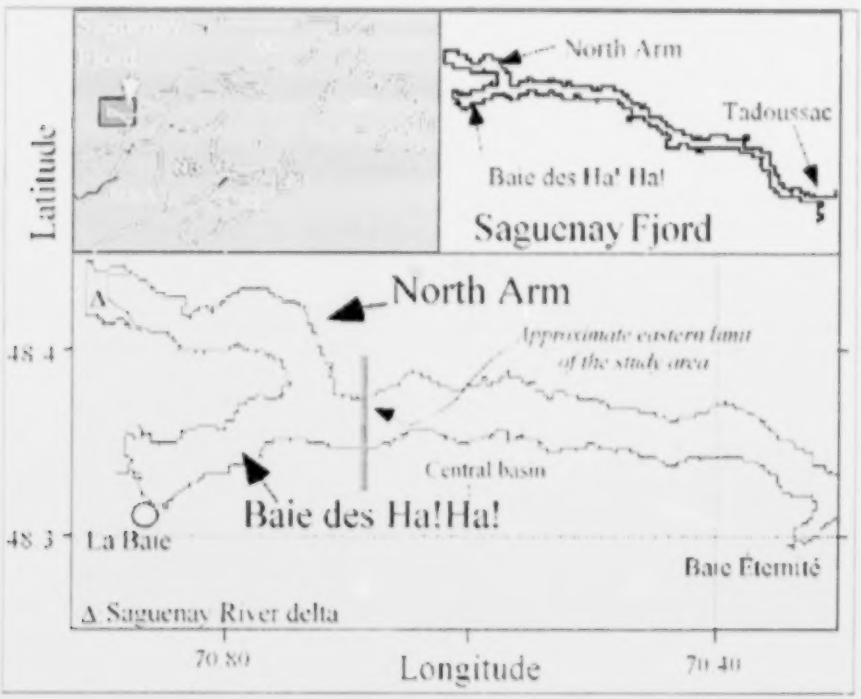


Immediately after the event, many research projects have focused on the effects of that disaster on the environment. Some of those projects have dealt with the effects of that flood on the Saguenay Fjord's ecosystem. A team of research scientists has been assembled to evaluate the potentially positive effect of that disaster, since the new sediment layer was covering contaminated sediments that lie at the bottom of the fjord. Theses scientists then started the study: *Efficiency of the catastrophic capping layer of July 1996 in acting as a barrier against contaminated sediments: an opportunity for technological advancement.* This project, referred to as the *Saguenay post-flood project*, has been financed for a period of five years (1997–2002), by the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada's strategic

1.0 Introduction

In July 1996, an exceptional climatic event left more than 200 mm of rain in the Saguenay–Lac-Saint-Jean region and had devastating effects on the people of that region as well as on the terrestrial infrastructures. Another devastating effect was the accumulation of more than 20 million tonnes of sediments in the upstream portion of the Saguenay Fjord, of which a good part came from the avulsion of the Ha! Ha! River and the intensive erosion of other major tributaries of the Saguenay Fjord region (Figure 1). This catastrophic event is referred to hereafter as the Saguenay flood, and the resulting catastrophic layer is called the flood layer. This layer is approximately 20 cm thick, but it gets as thick as 5 m at the mouth of the main rivers. The extent of this layer is highlighted in Figure 2 by the dark areas that appeared in 1997.

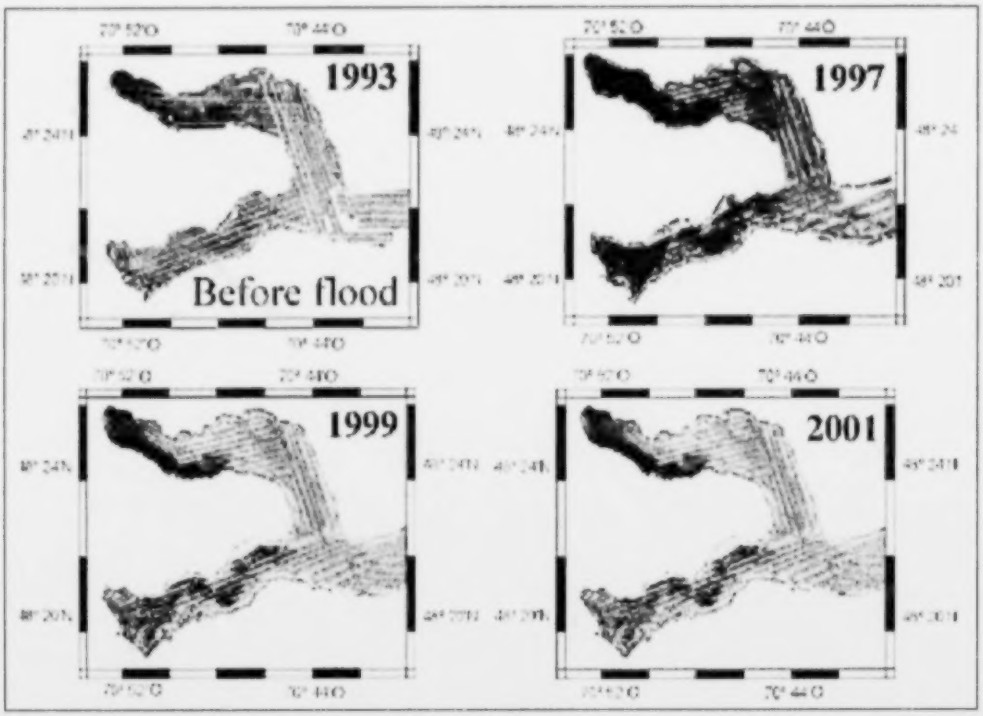
Figure 1 View of the study area in the upstream portion of the Saguenay Fjord.



Immediately after the event, many research projects have focused on the effects of that disaster on the environment. Some of those projects have dealt with the effects of that flood on the Saguenay Fjord's ecosystem. A team of research scientists has been assembled to evaluate the potentially positive effect of that disaster, since the new sediment layer was covering contaminated sediments that lie at the bottom of the fjord. Theses scientists then started the study: *Efficiency of the catastrophic capping layer of July 1996 in acting as a barrier against contaminated sediments: an opportunity for technological advancement.* This project, referred to as the *Saguenay post-flood project*, has been financed for a period of five years (1997–2002), by the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada's strategic

program, and Alcan Inc. The major research scientists, under the supervision of Jacques Locat (Université Laval), were: Gaston Desrosiers (ISMER), Rosa Galvez-Cloutier (Université Laval), Jean-Pierre Gagné (ISMER), Yves Gratton (INRS-ETE), Philip Hill (CSC Pacific), Serge Leroueil (Université Laval), Jean-Marie Konrad (Université Laval), Bernard Long (INRS-ETE), Claude Hilaire-Marcel (UQAM), Alphonso Mucci (McGill), Émilien Pelletier (ISMER), Peter Simpkin (SEISTEK), Anne de Vernal (UQAM), and Hélène Tremblay (Université Laval).

Figure 2 Extent of the 1996 flood layer



The initial planning of the project provided for the holding of two public workshops. The first was held in May 1998.[3] The second took place in May 2003 during the 2nd International Symposium on Contaminated Sediments, sponsored by the American Society for Testing and Materials (ASTM), the Canadian Geotechnical Society (CGS), the Canadian Society for Civil Engineering, and by the St. Lawrence chapter of SETAC (Society for Environmental Toxicology and Aquatic Chemistry). The 1998 workshop was general in nature. It allowed the integration of research problematics specific to the fjord in the overall research, and problematics identified specifically on the terrestrial side. The special session dedicated to the 2003 Saguenay post-flood, financed in part by OCIPEP, was an opportunity to share the conclusions drawn after five years of research and to share the results with the international community.

[3] Synopses of these workshops are available at:
www.ocipep.gc.ca/research/resactivites/natHaz/saguenay/1998_D001_e.asp

This report contains the results of this special session on the Saguenay post-flood project and emphasizes the various contributions and conclusions drawn from the research. These results will also be analyzed in light of OCIPEP's concerns with the management of the consequences of natural disasters, and to their effects on critical infrastructure (fishery, ecological tourism, etc.).

2.0 Scientific Objectives of the Saguenay Post-flood Project

The scientific objectives achieved by the project were to:

- Provide an answer concerning the efficiency of the capping layer;
- Satisfactorily identify the living species of the Saguenay Fjord that can be used as indicators of the level of environmental restoration of the site;
- Derive numerical or conceptual models enabling the evaluation and prediction of chemical reactions occurring around the capping layer;
- Provide a numerical simulation model that permits the prediction of contaminants transport through the capping layer;
- Evaluate this layer's resistance to erosion and earthquakes; and
- Group these various tools and techniques in one framework that could be used in the planning, achievement and prediction processes related to the performance of the capping layers (natural or human-made) deposited on contaminated sediments.

3.0 Scientific Results Disclosed during the Special Session

During the 2nd International Symposium on Contaminated Sediments, a special session was dedicated to the Saguenay post-flood project. Other results have already been published in scientific articles or disclosed during specialized conferences and have been grouped accordingly in the bibliography. In light of the framework of the 2003 special session, the majority of leading research scientists in both the private and public sectors came to share their findings. In total, 17 presentations were given; 15 were oral presentations and two were posters. Section 3.1 presents the titles of the various presentations, the author's name, and the order in which they occurred. The first is the presentation by invited participant Mr. Émilien Pelletier. The abstracts of all of the articles included in this session can be found in Appendix A.

3.1 Oral Presentations

1. The origin and behavior of a catastrophic capping layer deposited on contaminated sediments of the Saguenay fjord (Quebec); E. Pelletier, G. Desrosiers, J. Locat, A. Mucci, and H. Tremblay.

2. Execution of the Saguenay post-flood project: a unique project with exceptional people; J. Locat , H. Tremblay, R. Galvez-Cloutier, G. Desrosiers, J.P. Gagné, Y. Gratton, P. Hill, J.-M.Konrad, S. Leroueil, B. Long, C. Hilaire-Marcel, A. Mucci, E. Pelletier, P. Simpkin and A. de Vernal.

3. Results from multibeam, sedimentological and geotechnical data of the "Saguenay Project"; R. Urgeles and J. Locat.

4. Retention of Heavy Metals in the Post '96 Flood Sediment Layer Deposited in the Saguenay River, Quebec, Canada; R. Galvez-Cloutier, M. Muris, J. Locat, and C. Bourg.

5. Evolution of persistent organic pollutants (POP) in the sediments of the Baie des Ha! Ha! after the 1996 flood; M. Leboeuf, M. Noël, and S. Trottier.

6. Characterization of a Catastrophic Flood Sediment Layer: Geological, Geotechnical, Biological, and Geochemical Signatures; H. Tremblay, G. Desrosiers, J. Locat, A. Mucci, and É Pelletier.

7. In situ Flume measurements of sediment erodability in Saguenay Fjord (Quebec, Canada) A-L. Moreau, J. Locat, P. Hill, B. Long, and Y. Ouellet.

8. Trace Metal Mobility In Sediments Following A Catastrophic Depositional Event; A. Mucci, C. Guignard, and G. Bernier.

9. Factors controlling contaminant transport through the flood sediments of the Saguenay Fjord: Numerical sensitivity analysis; S. Dueri and R. Therrien.

10. Monitoring the origin, reactivity and residence time of suspended particulate matter in transitional environments using Th isotopes (234Th, 232Th, 230Th, 228Th) – Example from the Saguenay Fjord (Québec); P. Poulin, B. Ghaleb, C. Hillaire-Marcel, and A. Mucci.

11. Physical, magnetic, sedimentological, geochemical, isotopic and micropaleontological features of rapidly deposited layers in the Saguenay Fjord, Québec from 7200 cal BP to the 1996 AD flood layer; G. St-Onge, G. Bilodeau, A. de Vernal, C. Hillaire-Marcel, B. Ghaleb, J. Leduc, A. Mucci, J. Savard, D. Zhang, T. Mulder, D. Piper, and J. Stoner.

12. A complete re-assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of the Saguenay Fjord (Quebec); É. Pelletier, N. Côté, A. Curtosi, and R. St-Louis.

13. Selective extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from contaminated sediments using a high molecular weight surfactant; M. Barthe, and É. Pelletier.

14. Kinetics and mechanisms of polyaromatic hydrocarbons (PAH) sequestration in freshwater and marine sediment; D. Brion and É. Pelletier.

3.2 Poster Session

- Behaviour of high molecular weight PAHs in the new sediment layer of the Baie des Ha!Ha! (Saguenay Fjord); É. Pelletier and I. Desbiens.

- Contributions of the Saguenay post-flood project to the design of capping layers; H. Tremblay and J. Locat.

3.3 Other Scientific Documents

During the 2nd International Symposium on Contaminated Sediments, two documents comprising a collection of articles and long-form abstracts have been published. These documents are the following:

- Locat, J., Galvez-Cloutier, R., Chaney, R., and Demars, K. (Editors), 2003. Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation, Restauration and Management Strategy Performance. American society for Testing and Materials, Special Technical Publication 1442, 321 p.

- Tremblay, H., Locat, J. and Galvez-Cloutier, R., (authors) 2003. Transactions of the 2nd International Symposium on Contaminated Sediments, Québec, May 2003. CD-ROM.

In total, these two documents contain more than 90 complete articles and long-form abstracts on the topic of contaminated sediments.

4.0 Scientific Benefits of Research

In addition to meeting the previously stated objectives, the project also had scientific benefits, including:

- Definition of a new reference (1996 layer) enabling a more precise identification of the addition of contaminants in the Saguenay Fjord after the 1996 flood.

- Definition of the optimum conditions (minimum thickness of the layer that can effectively block the chemical and biological migration of the toxic substances trapped) for a possible capping of a layer of contaminated sediments by a layer of clean sediments in a deep marine area. These data could be used immediately in the remedial process in the Baie des Anglais at Baie-Comeau.

- Unique and diversified data combined in an interactive database on the Internet.

- Characterization of geochemical, mechanical and biological environmental recovery indicators.

- Development of planning and designing tools for a capping layer of contaminated sediments.

- Use of EM1000 and EM3000 to map and track the capping layers.

4.1 Considerations of the Marine and Coastal Effects of the July 1996 Flood

The various tasks accomplished in the upstream portion of the Saguenay after the July 1996 flood enable us to draw a few observations with regard to the actual and future effects of the Saguenay flood on the marine ecosystem and coastal infrastructures.

4.1.1 Marine Environment

In the marine environment, the Saguenay flood has put in place a capping layer that has momentarily disrupted the benthic fauna to such an extent that it almost completely disappeared from many sectors of the Baie des Ha! Ha! and of the North Arm. However, our studies clearly indicate that the rehabilitation of the benthic fauna has been very rapid. In less than two years, the majority of the study stations were showing an occupancy level similar to the one before the flood.

The various studies conducted have enabled the validation of the underlying hypothesis which stated that the July 1996 flood layer would act as an efficient protection layer against the migration of contaminants from the sediments present before the July 1996 flood.

The natural hazards analysis conducted in that region also showed that it would take an earthquake magnitude of 7.0 or more to perturb the 1996 layer, and that it would only occur in limited sectors.

Because of the mechanical (consolidation) and biological (bioturbation) stabilization, the capping layer becomes more resistant, particularly in the Baie des Ha! Ha!, to erosion and the normal currents do not succeed in eroding it. However, it is also important to note that the marine environment of the North Arm is much more dynamic. Our studies indicate that there have been sectors of the North Arm where there was erosion in the presence of strong currents coming from the Saguenay River and a re-deposition a bit further downstream. Given those conditions, the performance of the 1996 layer is more difficult to demonstrate in that sector.

The long-term performance of the 1996 flood layer as a whole will thus greatly depend on the future seismic activity; the only triggering factor capable of mobilizing large surfaces. Locally, the anchoring of large vessels in the outer bay of La Baie could also disrupt the surface layer in the long term.

In light of the various studies conducted, it appears that the aquatic and depositional environments came out of that disaster in better shape than before. As for the fjord, the assessment of the consequences of the catastrophic flood of 1996 has allowed us to point out the improvement in quality of the marine environment. Hence, the source of contaminants coming from the Baie des Ha! Ha! is in good part trapped under the 1996 layer. Correspondingly, the

quality of the water and of the benthic fauna should support the development of infrastructures associated with that region of the fjord, such as ice fishing, recreational activities, and any other industry that uses the water body.

4.1.2 Coastal Environment

The coastal environment was affected by the flood, especially by the accumulation of sediments and debris resulting from the erosion of rivers. An example of this is the filling of the Grande Baie marina.

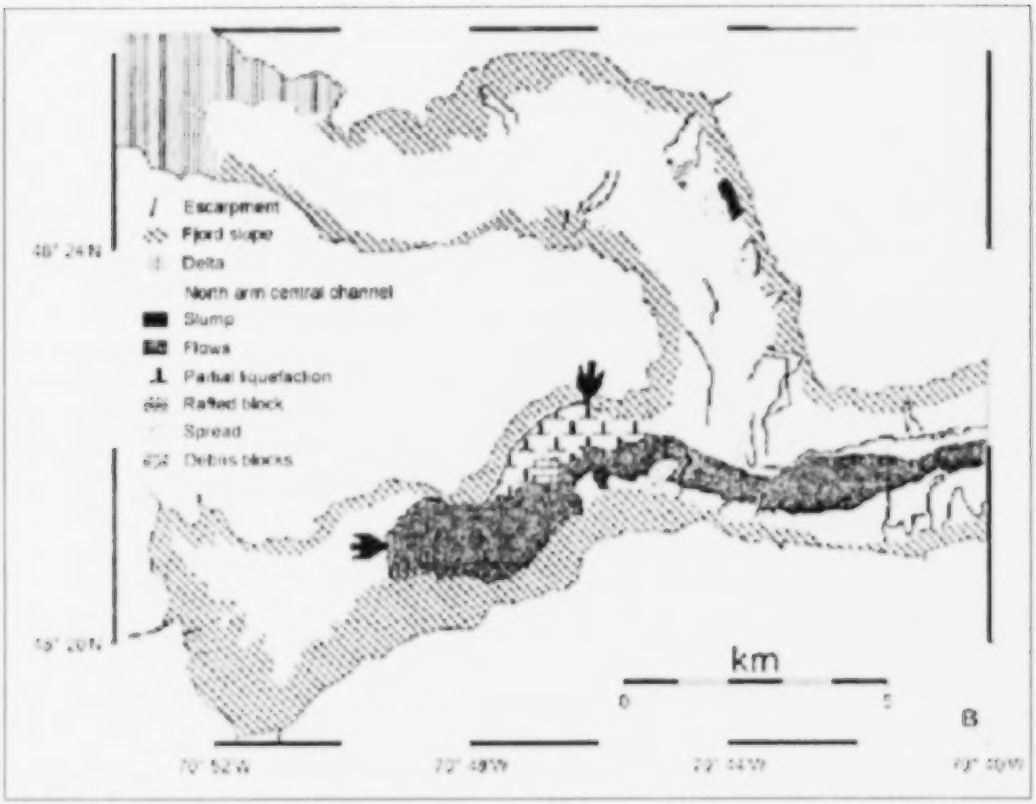
The addition of sediments has contributed to push the edge of the rivers' delta offshore, namely that of the Ha! Ha! River. The rapid accumulation of sediments has also favoured the development of areas of instability. These areas will most likely be more at risk in the event of a major earthquake (magnitude of seven or greater if the epicentre is located in the area (see Figure 4).

Research dealing with the response of the Saguenay sediments after an earthquake has enabled scientists to emphasize the morphological and analytical indications that lead us to believe that the epicentre of the 1663 earthquake could be located in the Saguenay region, rather than Charlevoix.

4.1.3 Landslides Hazard

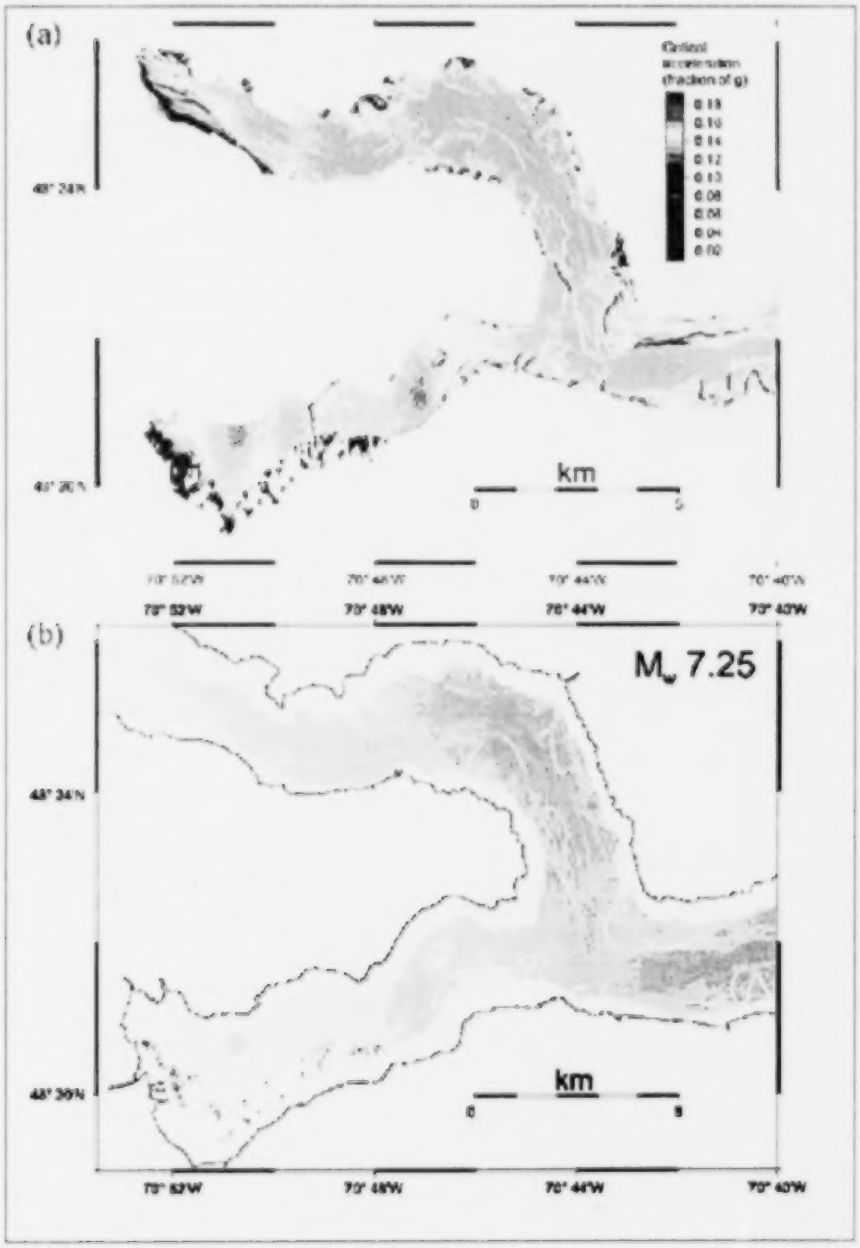
The means put forward to study the 1996 flood layer and its fate have allowed us to acquire a better understanding of the hazards related to landslides. For example, the analysis allowed the accounting of landslides in the upstream portion of the fjord (Figure 3) while highlighting important mass wasting, the majority of which would have been triggered by the 1663 earthquake.

Figure 3 Known extents of landslides potentially related to the 1663 earthquake (Urgeles *et al.*, 2002a).



The analysis of regional data on critical accelerations has been evaluated and compared to the properties of the surface layers of the Saguenay Fjord in order to evaluate the critical thresholds of seismic acceleration that can provoke instabilities (Figure 4a). From this analysis, it has been possible to conclude that only a major earthquake of a magnitude of 7.0 or more could destabilize the surface sediments and that the areas affected would be minimal, as shown in Figure 4b.

Figure 4 Effects of an earthquake on the surface sediments in the upstream portion of the Saguenay Fjord (a) critical acceleration required to create instability, and (b) potential instability area left by an earthquake of an intensity of 7.3 (modified according to Urgeles *et al.*, 2002a).



5.0 Conclusion on the Marine and Coastal Effects of the Saguenay Flood

In light of the research results presented at the special session on the Saguenay post-flood project during the 2nd International Symposium on Contaminated Sediments, conclusions can be drawn on the effects observed on the marine and coastal environments and recommendations made with regard to future research priorities in the Saguenay Region.

5.1 Effects on the Marine and Coastal Environments

The studies conducted in the upstream portion of the Saguenay Fjord allow the following conclusions:

1. The layer resulting from the 1996 flood, although unevenly distributed, acted as an efficient protection layer against the migration of contaminants found in underlying sediments.

2. The impact of the flood on the benthic fauna has been beneficial in providing a protection layer limiting the access of these organisms to the contaminants, in the long run this should help reduce the level of contaminants in the food chain of the animals feeding on the benthic fauna.

3. The coastal damage is limited to the areas close to river deltas.

4. The local and regional infrastructures associated with the use and exploitation of the fjord's aquatic environment found conditions even more favourable in terms of water quality as well as benthic fauna after the 1996 flood.

It is possible to rapidly deploy research teams to estimate the effect of natural disasters on the marine environment and on the shoreline communities because of the development and pooling of tools in the areas of chemistry, biology, geotechnics and geophysics. This is highly applicable, even in the area of emergency preparedness.

5.2 Future Research Priorities in the Saguenay Region

Work done in relation to the Saguenay post-flood project has enabled scientists to prioritize future research work as follows:

1. Regular monitoring of the stability of the slope in the straight portion of the actual deltas, namely that of the Ha! Ha! River.

2. Evaluation of the paleoseismicity of that region in order to gain knowledge about seismic hazard and to be able to include it in the risk evaluation in the marine as well as coastal environments.

3. Evaluation of the impact of ships on the remobilization of contaminated sediments.

These research activities could help communities gain knowledge about the actual risks in that region – the more susceptible areas as well as triggers. The effects of another event similar to the Saguenay flood could then be mitigated.

Bibliography

Publications in Scientific Journals

Crémer, J.-F., Long, B., Desrosiers, G., de Montety, L., Locat, J. 2002. Application de la scanographie à l'étude de la densité des sédiments et à la caractérisation des structures sédimentaires : exemple des sédiments déposés dans la rivière Saguenay (Québec, Canada) après la crue de juillet 1996. Can. Geotech. J., Vol. 39, pp. 440-450.

Deflandre B. and Gagné, J.-P.. 2001. Determination of dissolved organic carbon (DOC) in nanoliter samples using UV spectroscopy. Water Research, 35: 3057-3062.

Deflandre, B., Mucci, A., Gagné, J.-P., Guignard, C. and Sundby, B. 2001. Early diagenetic processes in coastal marine sediments disturbed by a catastrophic sedimentation event. Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 66, No. 14, pp. 2547-2558.

de Montety, L., Long, B., Desrosiers, G., Crémer, J.-F., Locat, J. et Stora, G. 2002. Utilisation de la scanographie pour l'étude des sédiments et des structures biogènes d'un milieu fortement perturbé : la baie des Ha! Ha!, Fjord du Saguenay, Québec, Canada. Journal canadien des Sciences de la Terre (accepté).

Dueri, S., R. Therrien, J. Locat. Numerical simulation of the migration of dissolved heavy metals through a subaqueous capping layer, accepté, Journal of Environmental Engineering and Science

Dueri, S. and Therrien, R. 2003. "Factors Controlling Contaminant Transport Through the Flood Sediments of the Saguenay Fjord: Numerical Sensitivity Analysis," Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance, ASTM STP 1442, J. Locat, R. Galvez-Cloutier, R. C. Chaney, and K. R. Demars, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, (sous presse)

Galvez-Cloutier, R., Muris, M., Locat, J., and Bourg, C.2003.Retention of Heavy Metals in the Post '96 Flood Sediment Layer Deposited in the Saguenay River, Quebec, Canada. *ASTM STP 1442*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (sous presse).

Leduc, J., Bilodeau, G., de Vernal, A. et Mucci, A. 2002. Distribution of benthic foraminiferal populations in surface sediments of the Saguenay Fjord, before and after the 1996 flood. Palaeogeogr., Palaeclimatol., Paleoecology, 180, 207-223.

Michaud, E., Desrosiers, G., Long, B., de Montety, L., Crémer, J.-F., Pelletier, E., Locat, J., Gilbert, F. and G. Stora. 2002. Use of axial tomography to follow temporal changes of benthic communities in an unstable sedimentary environment : (Ha! Ha! Bay, Saguenay Fjord). Jour. Exp. Mar. Biol. And Ecol. (in press).

Moreau, A-L., Locat, J., Hill, P., Long, B., and Ouellet, Y., 2003."In situ Flume Measurements of Sediment Erodability in Saguenay Fjord (Quebec, Canada)," Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance, ASTM STP 1442, J. Locat, R. Galvez-Cloutier, R. C. Chaney, and K. R. Demars, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA,(sous presse).

Mucci, A., Guignard, C., and Boudreau, B. 2003. Diagenetic mobility of trace elements in sediments covered by a flash flood deposit: Mn, Fe, and As. Applied Geochem. (sous presse).

Mucci, A., Richard, L.-P., Lucotte, M. and Guignard, C. 2000. The differential geochemical behavior of arsenic and phosphorus in the water column and sediments of the Saguenay Fjord estuary, Canada. Aquatic Geochemistry, **6:** 1-32.

Pelletier, E., Mostajir, B., Roy, S., Gosselin, M., Gratton, Y., Chanut, J.-P., Belzile, C., Demers, S., and Thibault, D. 1999. Crue éclair de julliet 1996 dans la région du Saguenay (Québec). 1. Impacts sur la colonne d'eau de la baie des Ha! Ha! et du fjord du Saguenay. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 56, 2120-2135.

Pelletier, E., Desrosiers, G., Locat, J., Mucci, A., and Tremblay, H. 2003 The Origin and Behavior of a Flood Capping Layer Deposited on Contaminated Sediments of the Saguenay Fjord (Quebec). Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance, ASTM STP 1442, J. Locat, R. Galvez-Cloutier, R. C. Chaney, and K. R. Demars, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA (sous presse)

Pelletier, E., Deflandre, B., Nozais, C., Tita, G., Derosiers, G., Gagné J.-P., and Mucci, A. 1999. Crue éclair de julliet 1996 dans la région du Saguenay (Québec). 2. Impacts sur les sédiments et le biote de la baie des Ha! Ha! et du fjord du Saguenay. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 56, 2136-2147.

Saulnier, I. et Mucci, A. (2000). Trace metal remobilization following the resuspension of estuarine sediments : Saguenay Fjord, Canada. Applied Geochemistry **15** : 191-210

St-Onge, G. et Hillaire-Marcel, C. 2001. Isotopic constraints on sedimentary inputs and organic carbon burial rates in the Saguenay Fjord, Quebec. Marine Geology, Vol. 176, pp. 1-22.

St-Onge, G., Leduc, J., Bilodeau, G., de Vernal, A., Devillers, R., Hillaire-Marcel, C., Loucheur, V., Marmen, S., Mucci, A. et Zhang, D. 1999. Caractérisation des sédiments récents du fjord du Saguenay à partir de traceurs physiques, géochimiques, isotopiques et micropaléontologiques. Géographie physique et Quaternaire, 53 : 339-350.

St-Onge, G., Mulder, T., Piper, D.J.W., Hillaire-Marcel, C. et Stoner, C. soumis. Earthquake and flood-induced turbidites in the Saguenay Fjord (Québec) : a Holocene paleoseismicity record. Quaternary Science Reviews.

Tita, G., Desrosiers, G. and Vincx, M.. 2000. New type of hand-held corer for meiofaunal sampling and vertical profile invertigation : a comparative study. Journal of the Marine Biological Association, U. K. 80, 171-172.

Tita, G., Desrosiers, G., Vincx, M., Gagné, J.-P. and Locat, J. 2001. Diversity and vertical distribution of nematode assemblages : the Saguenay fjord (Québec, Canada). Cahiers de Biologie Marine, Vol. 42, pp. 263-274.

Tremblay, H., Desrosiers, G., Locat, J., Mucci, A., and Pelletier, É. 2003. "Characterization of a Catastrophic Flood Sediment Layer: Geological, Geotechnical, Biological and Geochemical Signatures," Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance, ASTM STP 1442, J. Locat, R. Glavez-Cloutier, R. C. Chaney, and K. R. Demars, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, (sous presse).

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. & Gagné, J.-P.. 2002. Effects of temperature, salinity and dissolved organic matter on the sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to estuarine particles. Environmental Science and Technology, in correction (soumis).

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. & Gagné, J.-P.. 2002. Geosorbents lipid content as a cause of nonlinear sorption of polycyclic aromatic hydrocarbon. Environmental Science and Technology, (en correction).

Tremblay, L.; Gagné, J.-P & Brindle, J.-R. 2001. Analysis and geochemical study of sedimentary humic substances using DRIFT spectroscopy. In: Understanding and Managing Organic Matter in Soils, Sediments and Waters; Swift, R. S. and Spark, K. M. (Eds.), IHSS, St. Paul, MN, pp. 107-114.

Tremblay, L. & Gagné, J.-P., 2002. Fast Quantification of Humic Substances and Organic Matter by Direct Analysis of Sediments Using DRIFT Spectroscopy. Analytical Chemistry, 74, 2985-2993.

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. &.Gagné, J.-P. 2003. Sorption of PAHs to natural sorbents: impacts of humic and lipid fractions. In: Humic Substances: Nature's Most Versatile Materials; Ghabbour, E.A. and Davies, G. (Eds.), Taylor and Francis Inc., New York, (in press).

Urgeles, R., Locat, J., Lee, H. et Martin, F. 2002a. The Saguenay Fjord, Québec, Canada: Integrating marine geotechnical and geophysical data for spatial seismic slope stability and hazard assessment. Marine Geology. Vol. 185, pp. 319-340.

Urgeles, R., Locat, J., Schmitt, T., Hughes Clarke, J.E. 2002b. The July 1996 flood deposit in the Saguenay Fjord, Quebec, Canada: implication for sources of spatial and temporal backscatter variations. Marine Geol., Vol. 184, pp. 41-60.

Proceedings of Conferences

Barthe, M. and E. Pelletier, 2003. Selective extraction of PAHs from contaminated sediments using a large volume neutral surfactant. *Proc. 2nd Intern. Symp. on Contaminated Sediments,* Québec, (sous presse).

Crémer, J.F., Long, B., Locat, J. et Desrosiers, G. 2000. Application de la tomodensitométrie à l'étude de la densité des sédiments et à la caractérisation des structures sédimentaires : exemple des sédiments déposés dans le Saguenay après la crue de juillet 1996. *Proc. of the 53rd Can. Geot. Conf., Montreal*, pp. 153-159.

Deflandre B., Gagné, J.-P. & Desrosiers, G. 1999. Évolution géochimique des sédiments du Fjord du Saguenay (Québec, Canada) depuis la perturbation environnementale de juillet 96. Déluge du Saguenay de 1996, *numéro spécial Carrefour des Sciences de la Terre*, 23: 6-12.

Deflandre, B., Gagné, J.-P., Sundby B., Mucci, A., Guignard, C., Anschutz, P. 2000. The 1996 flood event : Disruption of the ongoing diagenesis of Saguenay fjord sediments. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal*, pp. 117-122.

De Montety, L., Long, B., Desrosiers, G., Crémer, J.F. et Locat, J. 2000. Quantification des structures biogènes en fonction d'un gradient de perturbation dans la Baie des Ha! Ha! à l'aide de la tomodensitométrie axiale. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal*, pp. 131-135.

Desrosiers, G., Gonon, M., de Montety, L., Pelletier, E., Nozais, C., Michaud, E., Stora, G., Long, B., Tremblay, H. et Locat, J. 2003. Évolution des peuplements benthiques après la crue éclair de 1996 dans la baie des Ha! Ha!, Fjord du Saguenay (Québec). *2nd Intern. Symp. on Contaminated Sediments*, Québec, (sous presse).

Kammerer, E., Hughes Clarke, J.E., Locat, Doucet, N., and Godin, A. 1998. Monitoring temporal changes in seabed morphology and composition using multibeam sonars: a case study of the 1996 Saguenay River floods. *Proc. of the Canadian Hydrographic Conference 1998*, Victoria, Canada, 450-461.

Locat, J., and Sanfaçon, R. 2000. Multibeam surveys: A major tool for Geosciences. *Proc. of the Canadian Hydrographic Conference 2000*, Montreal, Québec, Canada, CD-ROM.

Locat, J., Urgeles, R., Schmitt, T., Houareau, L., Martin, F., Hill, P., Long, B., Simpkin, P., Kammerer, E., Sanfaçon, R. 2000. The morphological signature of natural disasters in the Upper Saguenay Fjord area, Québec, Canada. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal*, pp. 109-116.

Locat, P., Locat, J., Leroueil, S., Urgeles, R., Hart, B. et Long, B. Caractérisation préliminaire du glissement sous-marin de la Pointe-du-Fort, Fjord du Saguenay, Québec, Canada. *Proc. of the 54th Canadian Geotechnical Conference,* Galgary, pp.752-759.

Martin, F., Konrad, J.-M., Locat, J., Locat, P., Urgeles, R., and Lee, H. 2001. Caractéristiques géotechniques et analyse du potentiel de liquéfaction des sédiments récents et post-glaciaires du fjord du Saguenay, Québec (Canada). *Proc. of the 54th Canadian Geotechnical Conference*, Galgary, pp. 776-783.

Maurice, F., Locat, J. et Leroueil, S. 2000. Caractéristiques géotechniques et évolution de la couche de sédiment déposée lors du déluge de 1996 dans la Baie des Ha! Ha! (fjord du Saguenay, Québec). *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Montreal, pp. 123-130.

Michaud, E., Long, B., Crémer, J.-F., Desrosiers, G. et De Montety, L. 2001. Les phases de construction deltaïques, influence d'un apport catastrophique. *Conf. Can. sur le littoral* 2001, Québec. pp. 533-547.

Moreau, A.-L., Amos, C., Locat, J., Hill, P., Ouellet, Y, Long, B. et Naaim, M. 2000. Étude expérimentale de l'érodabilité des sédiments déposés dans le fjord du Saguenay (Québec) lors du déluge de 1996. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Montreal, pp. 177-183.

Mucci, A., Guignard, C. and Olejczuyk, P. 2000. Mobility of metals and As in sediments following a large scale episodic sedimentation event. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference*, p.169-176.

Pelletier, E. et I. Desbiens, 2003. Behaviour of high molecular weight PAHs in the new sediment layer of the baie des Ha!Ha!. Proc. 2nd International Symposium on Contaminated Sediments, Québec, (sous presse).

Schmitt, T., Locat, J., Kammerer, E., Hill, P., Long, B. Clarke, J.H. and Urgeles, R. 2000. Analysis of the evolution of the reflectivity of sediments settled during the 1996 flood in the Saguenay Fjord, usig the SIMRAD EM1000 multibeam sonar. *Proc. of the Canadian Hydrographic Conference 2000*, Montreal, Québec, Canada, CD-ROM.

St-Onge, G. et Hillaire-Marcel, C. 2000. Inventaire des couches accidentelles récentes dans le fjord du Saguenay à partir des propriétés physiques de carottes de forages. *Proc of the 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Montreal, pp. 145-151.

Tremblay, H., Locat, J. et Urgeles, R. 2001. Géodynamique littorale de la couche diluvienne de 1996, Baie des Ha! Ha!, fjord du Saguenay, Québec, Canada. *Conf. Can. sur le littoral 2001*, Québec. pp. 507-522.

Tremblay, H., Locat, J., Mucci, A. and Pelletier, E. 2001. The efficiency of a catastrophic capping layer deposited in the Saguenay Fjord during the flood of 1996, Quebec. *Proc. of the 54th Canadian Geotechnical Conference*, Galgary, pp. 760-767.

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. & Gagné, J.-P. 2002. Effects of lipids on the nonlinear sorption of phenanthrene to sedimentary humic substances. *Proceedings of the International Humic Substances Society Twentieth-Anniversary Conference*, July 2002, Boston, pp. 443-445.

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. & Gagné, J.-P. 2002. Sorption of PAH to estuarine humic substances and impacts of temperature and salinity variations. *Proceedings of the International Humic Substances Society Twentieth-Anniversary Conference*, July 2002, Boston, pp. 155-157.

Urgeles, R., Locat, J., Lee, H., Martin, F., Konrad, J.-M. 2001. The Saguenay Fjord : Integrating marine geotechnical and geophysical data for spatial slope stability hazard analysis. *Proc. of the 54th Canadian Geotechnical Conference*, Galgary, pp. 768-775.

Appendix A – Abstracts for the Special Session on the Saguenay Post-flood Project

This appendix contains the abstracts of all of the articles and posters relating to the special session on the Saguenay post-flood project. The long-form abstracts and/or complete articles may be found in STP-1442 or in the Symposium Transactions, as applicable.

Oral Presentations

The Origin and Behaviour of a Catastrophic Capping Layer Deposited on Contaminated Sediments of the Saguenay Fjord (Quebec)

Emilien Pelletier[1], Gaston Desrosiers[1], Jacques Locat[2], Alfunso Mucci[3] and Hélène Tremblay[2]
[1] Institut des sciences de la mer (ISMER), Université du Québec à Rimouski, Rimouski (Que) Canada
[2] Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec (Que), Canada
[3] Department of Earth & Planetary Sciences, McGill University, Montreal (Que) Canada

ASTM STP 1442

ABSTRACT: The upper section of the Saguenay Fjord was impacted by a catastrophic flood in July 1996. Contaminated sediments were capped by a layer of clean silty post-glacial sediments with very low levels in trace metals (Cu, Cd, Cr, Hg, Pb, and Zn) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). The capping layer was characterized by geotechnical and geochemical methods and its biological recolonization was monitored by annual sampling of the macrofauna. The consolidation of the layer was completed within 3 months. The strong dominance of surface deposit feeders Cirratulidae and Ampharetidae was observed at most stations in the first 2-3 years followed by carnivorous annelids such as Lumbrineridae and Nephtidae; species indicating a well recolonized benthic habitat in the Baie des Ha! Ha!. The slope stability of the capping layer is considered as very good except in limited deltaic sectors at the head of the Baie des Ha! Ha! The new layer showed a good efficiency to isolate contaminated sediments from the Saguenay deep waters. Although manganese and iron were remobilized as the new layer became anoxic, mercury, arsenic and PAHs showed a very limited mobility through the flood layer.

Execution of the Saguenay post-flood project: a unique project with exceptional people

Jacques Locat[1], Hélène Tremblay[1], Rosa Galvez-Cloutier[1], Gaston Desrosiers[2], Jean-Pierre Gagné[2], Yves Gratton[3], Philip Hill[4], Jean-Marie Konrad[1], Serge Leroueil[1], Bernard Long[3], Claude Hilaire-Marcel[5], Alfonso Mucci[6], Émilien Pelletier[2], Peter Simpkin[7], Anne de Vernal[5]
[1] Département de Géologie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada
[2] Institut des Sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada
[3] INRS-ETE, Québec, Canada
[4] Commission géologique du Canada, région du Pacifique
[5] Université du Québec à Montréal
[6] Department of Earth & Planetary Sciences, McGill University, Montreal (Que) Canada
[7] Simpkin Inc

ABSTRACT: The Saguenay post-flood project was carried out during the period from 1997 to 2003. It has assembled many researchers who had to evaluate the performance of the 1996 flood layer to act as a barrier to the movement of the underlying contaminants and to develop various tools aimed at evaluating or monitoring the performance of this catastrophic barrier. After five years of research, we can conclude that this layer is efficient and shall resist most of the natural processes that could modify it with the exception of a large earthquake but even then the effects would be local. This work has required the participation of many universities and government organizations and has offered to possibility to train or educate more than 42 graduate students including 17 Ph.D's. The overall goal could be achieve not only from the direct funding but also from the previous knowledge acquired over the previous years by researchers which has enabled us to carry out the project at a total cost of about 1.3 million dollars. Major spin-offs from the Project not only consist in the data base but also in the increase knowledge that was gained of the various processes which are taking place here and moreover of the international recognition of the Saguenay Fjord as a major natural laboratory.

Evolution of the benthic populations after the flash flood of 1996 in the Baie des Ha! Ha!; Saguenay fjord (Quebec)

Gaston Desrosiers[1], Matthieu Gonon[1], Laure de Montety[1], Émilien Pelletier[1], Christian Nozais[1], Emma Michaud[2], Georges Stora[2], Bernard Long[3], Hélène Tremblay[4], Jacques Locat[4]
[1] Institut des Sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada
[2] Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie, Université de la Méditerranée, COM, Campus de Luminy, Marseille, France
[3] INRS-ETE, Québec, Canada,
[4] Département de Géologie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada

ABSTRACT: Following a flash flood which occurred in the Saguenay area in July 1996, the bottom of the Baie des Ha! Ha! was covered by a large quantity of new sediments. Its thickness decreased from the head of the bay towards the mouth. Perturbations in the benthic macrofauna resulting from this event have been more important in stations located near the mouth of the Rivière des Ha! Ha!. A 5-year benthic monitoring study was carried out at 5 stations (annual sampling). It has shown a re-colonization process of the new sediment layers mainly by

polychaetes. A different succession was observed for the major polychaete species between the stations located at the head of the bay and to the other sites. This succession was linked to the decrease of the deposit layer thickness. At station 2, the benthic macrofauna was mainly composed by deposit feeder. On the other hand, stations 5, 7, 9 and 13 were colonized by the subsurface deposit feeder *Scoloplos armiger* and carnivorous like *Lumbrinereis fragilis*. Statistical analysis showed that station 2 evolved differently from the other studied stations.

Results from multibeam, sedimentological and geotechnical data of the 'Saguenay Project'

Roger Urgeles[1], Jacques Locat[2]
[1] GRC Geociències Marines, Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines, Universitat de Barcelona, Campus de Pedralbes, 08028 Barcelona (Catalonia), Spain
[2] Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Ste.-Foy, Québec, Canada

ABSTRACT: In July 1996 a major flooding of the Saguenay region caused the delivery of a large amount of sediments to the Saguenay Fjord, which buried the former contaminated sediments. Several multibeam and sampling surveys where triggered by the flood which aimed to understand the concealing ability of the newly deposited sediments. These surveys showed the effects of the flood on the Fjord bottom but also the existence of older mass movements. Nevertheless a dynamic slope stability analysis showed that the fjord sediments are stable within the recurrence interval of major earthquakes. The backscatter strength from the multibeam data also showed the evolution of the flood layer, though to represent the wiping out of benthic life and the subsequent recolonization of the flood layer by the benthos.

Retention of Heavy Metals in the Post '96 Flood Sediment Layer Deposited in the Saguenay River, Quebec, Canada

Rosa Galvez-Cloutier[1], Myriam Muris[2], Jacques Locat[3], Cyril Bourg[2]
[1] Dept. of Civil Engineering. Laval University, Quebec, Canada
[2] Ecole Nationale de Travaux Public de l'État, Lyon, France
[3] Department of Geology, Laval University, Quebec, Canada

ASTM STP 1442

ABSTRACT: In July 1996 during a 50-year event flood, a new layer of sediments composed of debris, gravel and fine materials was transported and deposited over an ancient, one meter contaminated layer of sediments in the Saguenay River Fjord and Ha! Ha! Bay floors. During the Industrial Revolution years, various metallurgic, plastic, aluminum and pulp and paper production industries discharged their wastes on these waters, resulting in the high contamination of both water and sediments. This contamination limited the exploitation of fish and seafood. Given that the new layer is composed essentially of cleaner material, the zone is presenting important changes in the direction of a healthier environment. The Canadian Government and some of the surrounding industries aim to assess the new potential of the zone and its environmental safety. At present, it represents over a million-dollar study. This part of the Saguenay project aimed to recognize and evaluate the capacity of the new layer to contain and retain the contaminants left at the bottom layer. Particular interest is given to mercury and to

heavy metals such as Pb, Zn, Cd, and Ni and to their geochemical distribution among natural adsorbing materials such as clays, oxides, carbonates and organic matter. The paper presents the recognition and sampling mission on the Alcide Horth Ship, the contamination profiles given in two dimensions (length and depth), the geochemical distribution of heavy metals on the contaminated layer, transition layer and new layer as well as the evolution of their retention and transfer. Discussion and relations with common sediment characteristics such as grain size, cation exchange capacity and surface area are also given. Sequential selective extraction has been used jointly with scanning electron microscopy (SEM) to study heavy metal species.

Evolution of persistent organic pollutants (POP) in the sediments of the Baie des Ha! Ha! after the 1996 flood

Michel Lebeuf, Michelle Noël et Steve Trottier
Institut Maurice-Lamontagne, Ministère des Pêches et des Océans, Québec, Canada

ABSTRACT: In July 1996, a deluge of rain carried tonnes of soil into surface waters of the Saguenay region. Baie des Ha! Ha! and the North Arm of the Saguenay River were amongst the most affected areas. At some locations within the bay, sedimentary depositions exceeded 20 cm. This natural catastrophe has offered an exceptional opportunity to study the fate of persistent organic pollutants (POPs) buried by new sediments. In 1997, a study was initiated in order to characterise the levels and patterns of POPs in both new and old sediments. A 45 cm long sediment core was collected from Baie des Ha! Ha! and then sectioned in more than 20 layers. Water content and ^{210}Pb activity measured in the sediment layers allowed to estimate the thickness of the new sediment to about 20 cm. Concentrations of polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorinated pesticides (OCs) measured in the new sediments were approximately ten times lower than maximum concentrations in sediments deposited prior to the 1996 flood. In addition, new sediment cores collected in 1999 and 2000 allowed us to monitor the changes in distribution of PCBs and OCs in both new and old sediments. Results indicated that within this time frame, POPs were barely mobile within sediments of Baie des Ha! Ha!. Apparently, the new sediment layer moves away and isolates POPs from the water-sediment interface, reducing their access to benthic organisms and their transfer to the food web.

Characterization of a Catastrophic Flood Sediment Layer: Geological, Geotechnical, Biological, and Geochemical Signatures

Hélène Tremblay[1], Gaston Desrosiers[2], Jacques Locat[1], Alfunso Mucci[3], Émilien Pelletier[2]
[1] Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Ste.-Foy, Québec, Canada
[2] Institut des Sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada
[3] Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, Montreal, Qc, Canada

ASTM STP 1442

ABSTRACT : In 1996, an important rainstorm took place in the Saguenay region, Canada, that caused sever flooding and erosion of a large amount of post-glacial sedimentary material. Consequently, about 20 million tonnes of sediment were deposited in the upstream part of the

Saguenay Fjord, covering the recent, contaminated sediments with a 10 to 60 cm thick layer of relatively clean material. This flood layer was distinguished from the pre-flood sediments by various properties: low consistency and low resistance, high water content, the absence of benthic organisms, or the presence of inherited geochemical components. In this study, we evaluated the criteria used by the various investigators to identify the 1996 flood deposit, then finally compared its signature. Subsequently, we assessed the spatial variability of the deposit and its effect on the interpretation of temporal studies.

In situ Flume measurements of sediment erodability in Saguenay Fjord (Quebec, Canada)

Ann-Laure Moreau[1], Jacques Locat[1], Phillip Hill[2], Bernard Long[3], Yvon Ouellet[4]
[1] Department of Geology and Geological Engineering, Laval University, Quebec, Canada,
[2] Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Sidney, B.C.
[3] INRS-ETE, Québec, Canada
[4] Civil Engineering department, Laval University, Quebec, Canada,

ASTM STP 144

ABSTRACT : The erodability of superficial sediments in Saguenay Fjord, Quebec, was investigated during three years at 14 sites in the Baie des Ha!Ha! and the North Arm. This was carried out using a benthic flume: the *Miniflume*. Previous studies showed that the characteristics of the Saguenay fjord sediments varied greatly on small and large scales. The critical shear stresses and the erosion rates reflect this variability, with critical shear stresses ($_c$) between 0.06 and 0.44 Pa and mean erosion rates for the total erosion phase (E_{mean}) between 3.4 x10^{-4} and 1.25x10^{-5} kg.m^{-2}.s^{-1}. The measured critical shear stresses and rates were consistent with those of other *in situ* studies. Variability of the results is linked to important spatial variabilities of benthic sediments and not to temporal variabilities. Identification of erosion parameters (critical shear stresses and erosion rates) and of their important variability is the first step in determining the hazard linked to the erosion susceptibility of sediments in the Saguenay Fjord.

Trace Metal Mobility in Sediments Following a Catastrophic Depositional Event

Alfonso Mucci, Constance Guignard, and Geneviève Bernier
Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, Montreal, Qc, Canada

ABSTRACT: Following the flash floods of July 1996, several million tons of post-glacial sediments were eroded and carried to the Saguenay Fjord (Quebec, Canada). Tens of centimeters of this material were rapidly deposited on top of the contaminated sediments of the Fjord. Although the flash flood left more than $2 billion (CAN$) in damages on land, it was postulated that this sudden influx of post-glacial sediments may inhibit the remobilization of contaminants associated with the indigenous sediment.

The vertical distribution and concentrations of Fe, Mn, As and Hg were measured in the pore waters and sediments recovered from box-cores taken each year since the flood along the main axis of the Fjord and in the Baie des Ha! Ha!. Time series analyses reveal that manganese remobilization was unaffected by the accumulation of the flood deposits. Authigenic manganese

oxyhydroxides present at the original sediment-water interface and the flood material were reduced and Mn(II) diffused almost freely to the newly established interface where it was oxidized and precipitated. In contrast, iron associated with the authigenic oxyhydroxides at the original interface was trapped as sulfides under the sulfate-reducing conditions that were rapidly established. Most of the arsenic and mercury associated with the pre-flood sediments also appear to have been trapped with the authigenic sulfides (i.e., AVS), thus limiting their diffusion through the flood deposit.

Factors controlling contamiant transport through the flood sediments of the Saguenay Fjord : Numerical sensitivity analysis

Dueri, S. and Therrien, R., Département de Géologie et génie géologique, Université Laval, Québec, QC, Canada

ASTM STP 1442

ABSTRACT: In July 1996, two days of intense rainfall caused severe flooding in the Saguenay region and led to the discharge by rivers of several million cubic meters of clean sediments to the Fjord. This turbidite layer, composed of clean sediments, represents a potential barrier for the migration of heavy metals and PAHs from the underlying contaminated sediments towards the new sediment-water interface. A numerical model has been developed to simulate the vertical migration and remobilization of dissolved contaminants in the capping layer. The model includes the main physical, chemical and biological factors affecting the contaminant flux in the cap. Calibration of the model has been achieved through comparison with the data collected during the field and laboratory characterization of the sediments of the Saguenay Fjord. A detailed sensitivity analysis, based on factorial design, shows that the model parameters associated with bio-irrigation have the greatest impact on the model output and by extension on the effectiveness of a capping layer.

Monitoring the origin, reactivity and residence time of suspended particulate matter in transitional environments using Th isotopes (234Th, 232Th, 230Th, 228Th) – Example from the Saguenay Fjord (Québec)

Patrick Poulin, Bassam Ghaleb, Claude Hillaire-Marcel and Alfonso Mucci
GEOTOP – UQAM & McGill

ABSTRACT: In the Saguenay Fjord the pycnocline, which separates the fresh water of the Saguenay River from the marine water that originates from the St. Lawrence estuary, displays high concentrations (2-5 mg/L) of suspended particulate matter (SPM). This SPM is the locus of a number of processes, including adsorption, desorption and coagulation, that play a major role on the fate of contaminants in the fjord. In this study, we pay special attention to the composition (i.e., organic/inorganic) and mineralogy of the SPM, to its adsorption of short-lived thorium isotopes (^{228}Th and ^{234}Th), produced by the decay of dissolved ^{228}Ra and ^{238}U, respectively, as well as to its content in other Th isotopes (^{230}Th-^{232}Th) in relation to its mineralogy, grain size and origin (*i.e.*, Precambrian *vs.* Paleozoic bedrocks or Quaternary deposits). The primary objective of the study is to document the residence and/or transit time of the SPM in the Fjord, as

well as to assess scavenging rates of heavy metals, based on the ratios of short-lived Th isotopes to the other isotopes of the element.

SPM samples were collected from large volumes of water (300-600 L) taken at the pycnocline, and concentrated by tangential filtration. Sampling was conducted in May and September 2001 with the complementary goal to understand the impact of seasonal hydrographic variations on SPM composition and fluxes and on Th-isotope scavenging rates. The isotopes were analyzed by alpha (^{230}Th-^{232}Th-^{228}Th) or beta (^{234}Th) spectrometry. Complementary analyses included measurements of organic carbon and total nitrogen contents, ^{13}C and ^{15}N-isotope compositions, and semi-quantitative mineralogical analysis by X-ray diffraction.

Results show that the organic fraction of the SPM consists primarily of algal and bacterial material produced within the Fjord or upstream in the Saguenay River. The mineral fraction of SPM is essentially inherited from the migmatites of the Precambrian basement. ^{234}Th, ^{232}Th, ^{230}Th, and ^{228}Th activities in SPM increase from the head towards the outlet of the Fjord and display a seasonal pattern. The downstream increase in ^{232}Th and ^{230}Th, is interpreted as a consequence of the decreasing grain size of the particles. The increase in ^{234}Th and ^{228}Th (relative to ^{232}Th) is the result of subsequent adsorption of these isotopes produced *in-situ* by the decay of dissolved ^{238}U and ^{228}Ra, respectively, ^{228}Th/^{232}Th ratios vary seasonally and spatially between 0.5 and 2, with up to a 2 fold increase downstream relative to the head of the Fjord. ^{234}Th/^{232}Th activity ratios as high as 80 are observed in the SPM recovered from the pycnocline, indicating a high production rate in the overlying surface water and an efficient adsorption/scavenging of ^{234}Th. In order to estimate transit or residence times of SPM, through the Fjord, we assumed a constant ^{238}U/^{228}Ra ratio in the surface water layer, thus a constant ratio between the production rates of ^{234}Th and ^{228}Th (R_0). The ratio (R) between the excess ^{234}Th and ^{228}Th in the SPM was used to calculate a transit time $t = \mathrm{Ln}(R_0/R)*[1/(\lambda_{234}-\lambda_{238})]$, where λ_{234} and λ_{238} are the decay constants of ^{234}Th and ^{228}Th, respectively. Since $\lambda_{234} >> \lambda_{238}$, $t \sim \mathrm{Ln}(R_0/R)*1/\lambda_{234}$. Residence or transit times ranging from 3 to 21 days, were obtained. Measurements of ^{238}U and ^{228}Ra in the water column are planned in order to validate this approach. Delayed measurements of ^{228}Th/^{232}Th ratios in aliquots of SPM collected in year 2001 are in progress and will provide insights into the initial ^{228}Ra/^{232}Th disequilibria in SPM, due to ^{228}Ra losses.

Physical, magnetic, Sedimentological, GEOCHEMICAL, isotopic and micropaleontological features of rapidly deposited layers in the Saguenay Fjord, Québec: from 7200 cal BP to the 1996 AD flood layer

Guillaume St-Onge[1], Guy Bilodeau[1], Anne de Vernal[1], Claude Hillaire-Marcel[1], Bassam Ghaleb[1], Julie Leduc[1], Alfonso Mucci[1], Josée Savard[1], Deke Zhang[1], Thierry Mulder[2], David Piper[3], Joseph Stoner[4]

[1] GEOTOP-UQÀM-McGill, Montréal, QC, Canada

[2] Université de Bordeaux 1, Talence, France

[3] Geological Survey of Canada (Atlantic), Dartmouth, NS, Canada

[4] INSTAAR, University of Colorado, CO, USA

ABSTRACT: Sedimentological, geochemical, isotopic and micropaleontological properties of surface and sub-surface sediments cored in the Saguenay Fjord and adjacent Baie des Ha!Ha! allowed the identification of several rapidly deposited layers (RDL). The most recent ones in box-cored sediments include layers deposited during the 1996 AD flood, the 1988 AD earthquake and the 1971 AD landslide of St-Jean-Vianney. Short-lived isotope (^{228}Th, ^{210}Pb and ^{137}Cs) measurements suggest discrete mixing, notably on top of these layers, but all were buried rapidly enough to preserve most of their original isotopic signature. Analyses of foraminifers collected before and after the 1996 AD flood indicate that the recolonization of surface sediments by the benthic microfauna was almost immediate, with increased species diversity as compared to pre-flood sediments, suggesting that the 1996 AD flood layer has played a role in isolating the underlying contaminated sediments. A total of 14 RDL likely resulting from high magnitude (>6) earthquakes during the last ~7200 calibrated years BP were also recognized in a 38 m-long piston core from the inner basin of the Fjord. They include an approximately 16 m-thick layer associated with the great historical earthquake of 1663 AD.

A complete re-assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of the Saguenay Fjord (Québec)

Émilien Pelletier, Nathalie Côté, Antonio Curtosi, Richard St-Louis
Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski
Rimouski, QC, Canada

ABSTRACT: The objective of this work is to provide a new series of data on the spatio-temporal distribution of PAHs in sediments of the Saguenay Fjord and the Baie des Ha!Ha! about 15 years after the last exhaustive report on the topic. Five sediment cores have been sampled from various sectors of the Fjord in Spring 2002 and analysed for their content in PAHs by GC/MS. Total PAHs (selected 16 priority HAPs) are reported for the first 28 cm of each core. The mean concentration in the surface layer (0.0-0.5 cm) was 310 ng/g (dry weight) with a maximum value of 460 ng/g found at core 5 in the North Arm of the Fjord and a minimum value of 227 ng/g found in the Baie des Ha!Ha!. Surface values reported here are between 10 and 30 times lower than those previously reported for cores sampled in 1982 (Martel et a. 1987). All cores show maximum PAHs values in layers between 15 and 28 cm depth indicating a slow burying process of highly contaminated sediments brought to the fjord in the 1960s and 1970s.

Selective extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from contaminated sediments using a high molecular weight surfactant

Mickaël Barthe, Émilien Pelletier
Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski
Rimouski, QC, Canada

ABSTRACT: The objective of the project was to develop a selective extraction method for PAHs that could mimic the digestive action of microorganisms and benthic invertebrates and contribute to understand the influence of chemical sequestration on the bioavailability and the toxicity of organic molecules present in marine sediments. Preliminary tests to determine the selectivity and efficiency of a series of surfactants led us to the choice of the polyoxyethylene(100) stearyl ether (Brij® 700) with an optimum concentration of 5.25×10^{-3} M. Results obtained with Brij® 700 show that the development of a selective extraction method of PAHs using a high molecular weight synthetic surfactant presenting some similarities with natural surfactants produced by microbial communities can provide relevant data that can be related to sequestration mechanisms. Our protocol was tested with 17 samples from the Saguenay Fjord. In a general manner, the high-molecular weight PAH compounds were less extracted by Brij® 700 than the low-molecular weight PAH compounds.

Kinetics and mechanisms of polyaromatic hydrocarbons (PAH) sequestration in freshwater and marine sediment

Denis Brion, Émilien Pelletier
Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski
Rimouski, QC, Canada

ABSTRACT: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) are known to be persistant in marine and freshwater sediments. An aging process often called sequestration is responsible for the change in the availability of PAHs and is attributed to a slow migration of aromatic molecules into condensed organic matter and inaccessible microsites. To study the rate of PAH sequestration under laboratory conditions, natural sediment samples were spiked with [^{2}H]-PAH and labelled PAH were re-extracted periodically with an aqueous solution of a high molecular weight surfactant (Brij® 700) to estimate not sequestrated PAHs. Adsorbed molecules became slowly sequestered into inaccessible microsites and gradually more difficult to extract. A mathematical model was developed to quantify the rate constants of the sequestration process. The model was based on a three-compartment dynamic system in which aromatic compounds are taken up and sequestered by particulate matter. With the experimental conditions and the knowledge on diffusional process the three-compartment system was simplified to a first-order consecutive-irreversible two-stage reaction. The mean sequestration rate value of k_2 was ten times slower than the adsorption rate k_1.

Poster Session

Behavior of high molecular weight PAHs in the new sediment layer of the Baie des Ha! Ha! (Saguenay Fjord)

Émilien Pelletier, Isabelle Desbiens
Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski
Rimouski, QC, Canada

ABSTRACT: A series of four sediment cores was collected between 1998 and 2002 in the center of the Baie des Ha! Ha! with the objective to study the behaviour of a number of high molecular weight polyaromatic hydrocarbons (PAHs) deposited immediately after the July 1996 flash flood in the Saguenay Fjord. Dry samples were extracted with dichloromethane (DCM) and then analysed by liquid chromatography (HPLC-Fluorescence). Benzo(a)pyrene (BaP) was selected as the best indicator of the mixing process with the underlying sediment layer. Results show a progressive burying of BaP and its homogenization in the top 0-12 cm layer during the four years of continuous observation. Considering the very low solubility of BaP, its low degradability by micro organisms, and its preferential binding to particulate organic carbon, we consider BaP as a good indicator for the estimation of the organic carbon burying rate in a sediment layer from a recent surface sedimentation.

Contributions of the Saguenay post-flood project to the design of capping layers

Hélène Tremblay, Jacques Locat
Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, QC, Canada

ABSTRACT: *In situ* capping of contaminated sediments is a method consisting of placement of a subaqueous layer of sediments, or other material, over contaminated sediments in order to protect the environment from the toxic effects of contaminants. The experience has demonstrated that among possible remediation methods, capping with clean material, employed successfully since the end of the 70's, is one of the most economical and effective approaches. However, there are some lacunas in different aspects of the capping design. During the Saguenay Post-Flood Project, some of them were filled by researchers who have developed methodologies and modelling to improve the capping design. The contribution of the Saguenay Post-Flood Project includes: 1) a methodology to evaluate the bioturbation depth using an axial tomodensitometer; 2) a diagenetic model to evaluate the mobilisation of metals trough the capping layer, 3) a contaminant transfer model that consider bioturbation; 4) a consolidation model that consider bioturbation; 5) a methodology to determine the integrity of the capping layer and the evolution of recolonisation using backscatter data from multibeam sonar surveys, and 6) a decision analysis related to capping design. This paper not only presents these different developments, but also a literature review about these aspects of capping design.

Public Safety and Emergency Preparedness Canada
Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparedness

Sécurité publique et Protection civile Canada
Protection des infrastructures essentielles et Protection civile

Évaluation de l'impact du déluge du Saguenay sur les environnements marins et côtiers, et les communautés

Remerciements

Cette publication a été préparée pour :

Sécurité publique et
Protection civile Canada

340, avenue Laurier Ouest, 12e étage
Ottawa (Ontario) K1A 0P8
Tél : (613) 994-4875
Sans frais : 1-800-830-3118
Téléc : (613) 998-9589
Courriel : communications@sppcc-psepc.gc.ca
Internet : www.sppcc-psepc.gc.ca

Auteur :

Jacques Locat
Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN)
Groupe de recherche en géo-ingénierie et en environnement (GREGI)
Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, G1K 7P4
Tél. : 1 418 656 2179, Téléc. : 1 418 656 7339
Courriel : locat@ggl.ulaval.ca

Ce document s'inspire d'un travail financé par la Direction de la recherche et du développement (DRD) du Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile (BPIEPC), en vertu du contrat portant le numéro de référence 2003D011. Le 12 décembre 2003, le BPIEPC a été intégré à un nouveau ministère, soit Sécurité publique et Protection civile Canada (SPPCC). Les opinions, constations et conclusions ou recommandations exprimées dans le présent document sont celles de l'auteur et ne correspondent pas nécessairement aux points de vue de Sécurité publique et Protection civile Canada.

© SA MAJESTÉ LA REINE DU CHEF DU CANADA (2004)
No du catalogue : PS48-4/2004F-PDF
ISBN : 0-662-76514-1

Résumé

En juillet 1996, un événement climatique exceptionnel a laissé plus de 200 mm de pluie dans la région du Saguenay Lac Saint-Jean avec des conséquences catastrophiques pour la population de la région ainsi que pour les infrastructures terrestres. Une autre conséquence catastrophique fût l'accumulation de plus de 20 millions de tonnes de sédiments dans la partie amont du fjord du Saguenay dont une bonne partie venait de l'avulsion de la rivière des Ha! Ha! ainsi que de l'érosion intense des autres affluents majeurs de cette région du fjord du Saguenay. Peu de temps après le déluge, un groupe de chercheurs a été rassemblé afin d'évaluer l'impact potentiellement positif de cette catastrophe; la nouvelle couche de sédiment venait recouvrir les sédiments contaminés gisant au fond du fjord. Ce regroupement a alors débuté une étude intitulée : L'efficacité de la couche de recouvrement catastrophique de juillet 1996 comme barrière aux sédiments contaminés : une occasion de développement technologique.

Les résultats scientifiques des travaux de recherche ont été publiés dans plusieurs articles de revues scientifiques ou de conférence. Les comptes rendus du Symposium sur le déluge du Saguenay, symposium qui s'est tenu au début du projet et avec la participation du BPIEPC,[1] sont disponibles sur le site Web.[2] La dernière activité prévue dans le cadre du projet Saguenay post-déluge a eu lieu dans le cadre du 2e Symposium international sur les sédiments contaminés qui s'est tenu à Québec en mai 2003. Ce rapport présente les résultats de la session spéciale sur le projet Saguenay post-déluge et permet de souligner les diverses contributions et conclusions issues des travaux de recherche. Ces résultats seront aussi mis en lumière par rapport aux préoccupations du BPIEPC.

Les travaux nous permettent de conclure que :

1. Il est possible de rapidement déployer des équipes de recherche permettant d'évaluer l'impact de catastrophes naturelles sur le milieu marin et les communautés riveraines grâce à la mise en commun et au développement d'outils tant du domaine de la chimie, de la biologie, de la géotechnique que de la géophysique.

2. La couche diluvienne de 1996, bien que répartie inégalement, agit comme une couche de protection efficace contre la migration des contaminants situés dans les sédiments sous-jacents.

3. L'impact du déluge sur la faune benthique a été bénéfique en fournissant un écran de protection limitant l'accès de ces organismes aux contaminants, ce qui devrait à long terme réduire le niveau de contaminants dans la chaîne alimentaire des animaux qui s'y nourrissent.

4. Les dommages côtiers sont limités aux zones à proximité des deltas des rivières.

---

[1] Le 12 décembre 2003, le Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile (BPIEPC) a été intégré à un nouveau ministère, soit Sécurité publique et Protection civile Canada (SPPCC).

[2] www.ocipep.gc.ca/research/resactivites/natHaz/saguenay/1998_D001_f.asp

Les infrastructures locales et régionales associées à l'utilisation et à l'exploitation du milieu aquatique du fjord y retrouvent, après le déluge de 1996, des conditions encore plus favorables tant du point de vue de la qualité de l'eau que de la faune benthique.

Table de matières

Remerciements ..... **ii**

Résumé ..... **iii**

1.0 Introduction **1**

2.0 Objectifs scientifiques du projet Saguenay post-déluge **3**

3.0 Résultats scientifiques présentés lors de la session spéciale **4**

3.1 Présentations orales 4
3.2 Session d'affiches 5
3.3 Autres documents scientifiques 5

4.0 Retombées scientifiques de la recherche **6**

4.1 Considérations sur les impacts marins et côtiers du déluge de juillet 1996 6
4.1.1 Milieu marin 6
4.1.2 Milieu côtier 7
4.1.3 L'aléa glissements de terrain 8

5.0 Conclusion sur les impacts marins et côtiers du Déluge du Saguenay **10**

5.1 Impacts sur les milieux marins et côtiers 10
5.2 Priorités de recherche futures dans la région du Saguenay 10

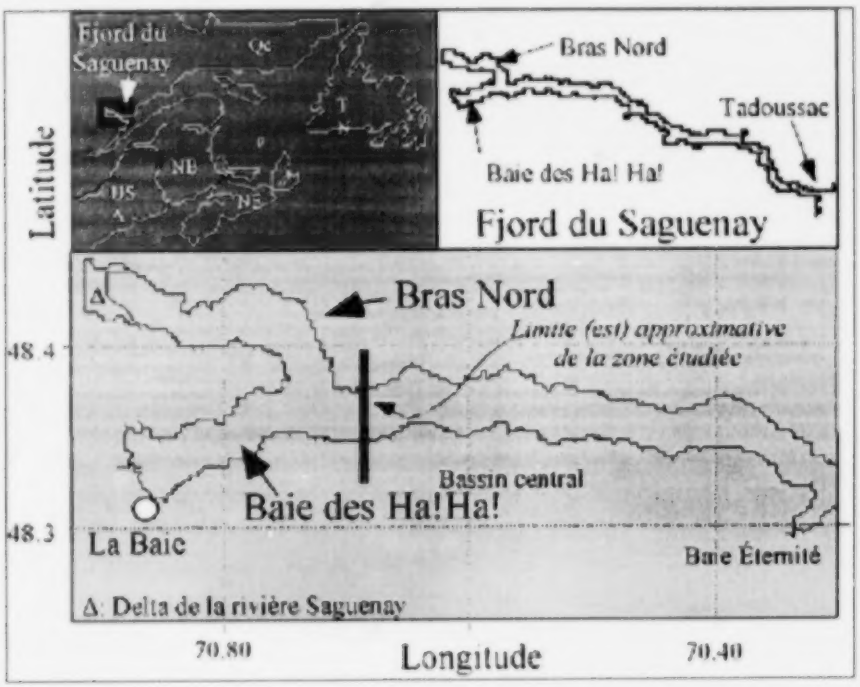
Bibliographie **12**

Annexe A – Résumés reliés à la session spéciale sur le projet Saguenay Post-déluge .. **A-1**

1.0 Introduction

En juillet 1996, un événement climatique exceptionnel a laissé plus de 200 mm de pluie dans la région du Saguenay Lac Saint-Jean avec des conséquences catastrophiques pour la population de la région ainsi que pour les infrastructures terrestres. Une autre conséquence catastrophique fût l'accumulation de plus de 20 millions de tonnes de sédiments dans la partie amont du fjord du Saguenay dont une bonne partie venait de l'avulsion de la rivière des Ha! Ha! ainsi que de l'érosion intense des autres affluents majeurs de cette région du fjord du Saguenay (figure 1). Cet événement catastrophique est nommé ci-après sous le vocable du Déluge du Saguenay alors que la couche catastrophique qui en a résulté au fond du fjord est appelée la Couche diluvienne. Cette couche a une épaisseur variable variant autour de 20 cm mais avec des valeurs de plus de 5 mètres aux embouchures des principales rivières. L'étendue de cette couche est mise en évidence à la figure 2 par les zones sombres nouvelles qui apparaissent nettement en 1997.

Figure 1 Vue de la région étudiée dans la partie amont du Fjord du Saguenay.

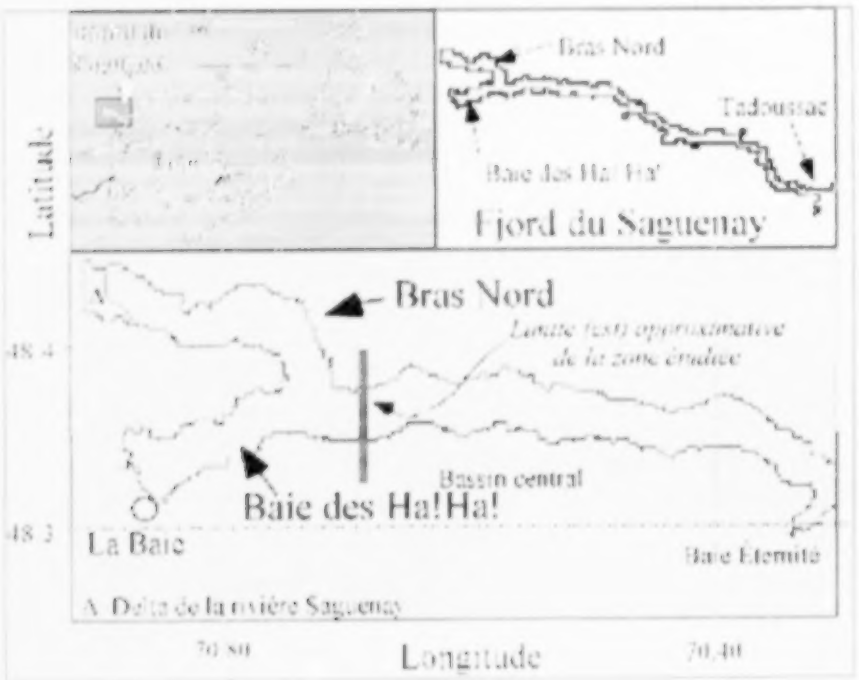


Tout de suite après l'événement, plusieurs études ont été consacrées aux impacts de cette catastrophe sur l'environnement. Quelques unes de ces études ont porté sur l'impact du déluge sur l'écosystème du fjord du Saguenay. Un groupe de chercheurs a été rassemblé afin d'évaluer l'impact potentiellement positif de cette catastrophe, étant donné que la nouvelle couche de sédiment venait recouvrir les sédiments contaminés gisant au fond du fjord. Ces chercheurs ont alors débuté une étude intitulée : *L'efficacité de la couche de recouvrement catastrophique de juillet 1996 comme barrière aux sédiments contaminés : une occasion de développement technologique*. Ce projet, dont le nom de code était le *Projet Saguenay post-déluge* (PSPD), a été

1.0 Introduction

En juillet 1996, un événement climatique exceptionnel a laissé plus de 200 mm de pluie dans la région du Saguenay Lac Saint-Jean avec des conséquences catastrophiques pour la population de la région ainsi que pour les infrastructures terrestres. Une autre conséquence catastrophique fût l'accumulation de plus de 20 millions de tonnes de sédiments dans la partie amont du fjord du Saguenay dont une bonne partie venait de l'avulsion de la rivière des Ha! Ha! ainsi que de l'érosion intense des autres affluents majeurs de cette région du fjord du Saguenay (figure 1). Cet événement catastrophique est nommé ci-après sous le vocable du Déluge du Saguenay alors que la couche catastrophique qui en a résulté au fond du fjord est appelée la Couche diluvienne. Cette couche a une épaisseur variable variant autour de 20 cm mais avec des valeurs de plus de 5 mètres aux embouchures des principales rivières. L'étendue de cette couche est mise en évidence à la figure 2 par les zones sombres nouvelles qui apparaissent nettement en 1997.

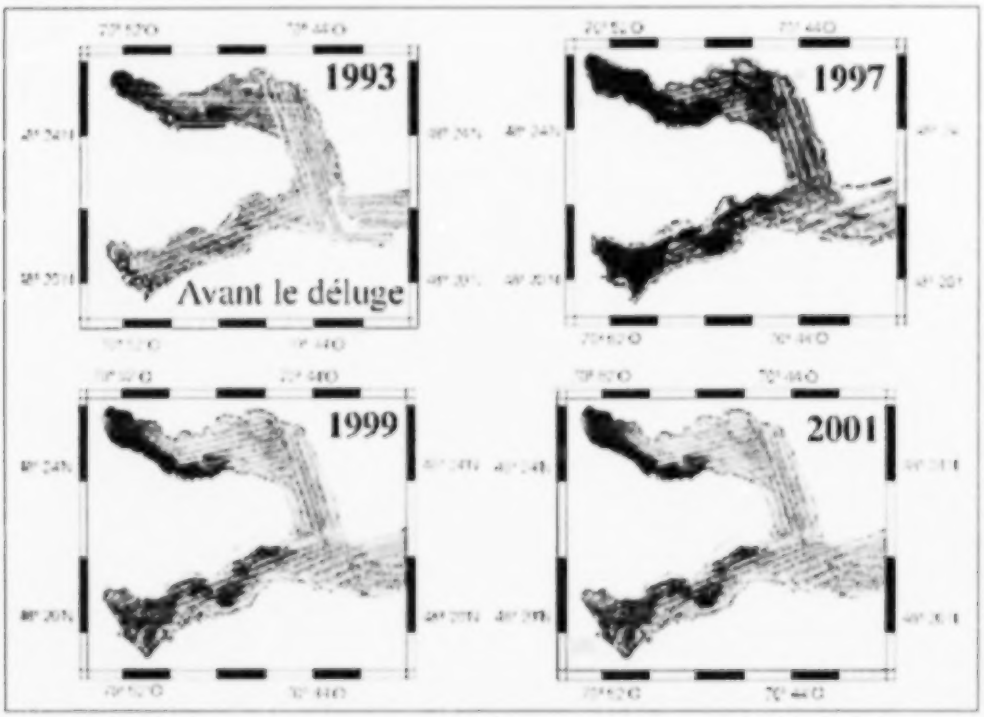
Figure 1 Vue de la région étudiée dans la partie amont du Fjord du Saguenay.



Tout de suite après l'événement, plusieurs études ont été consacrées aux impacts de cette catastrophe sur l'environnement. Quelques unes de ces études ont porté sur l'impact du déluge sur l'écosystème du fjord du Saguenay. Un groupe de chercheurs a été rassemblé afin d'évaluer l'impact potentiellement positif de cette catastrophe, étant donné que la nouvelle couche de sédiment venait recouvrir les sédiments contaminés gisant au fond du fjord. Ces chercheurs ont alors débuté une étude intitulée : *L'efficacité de la couche de recouvrement catastrophique de juillet 1996 comme barrière aux sédiments contaminés : une occasion de développement technologique*. Ce projet, dont le nom de code était le *Projet Saguenay post-déluge* (PSPD), a été

financé, pour une période de 5 années (1997-2002), par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (programme Stratégique) et par l'Alcan Inc.. Les chercheurs principaux, sous la direction de Jacques Locat (U. Laval), étaient : Gaston Desrosiers (ISMER), Rosa Galvez-Cloutier (U. Laval), Jean-Pierre Gagné (ISMER), Yves Gratton (INRS-ETE), Philip Hill (CGC-Pacifique), Serge Leroueil (U. Laval), Jean-Marie Konrad (U. Laval), Bernard Long (INRS-ETE), Claude Hilaire-Marcel (UQAM), Alphonso Mucci (McGill), Émilien Pelletier (ISMER), Peter Simpkin (SEISTEK), Anne de Vernal (UQAM) et Hélène Tremblay (U. Laval).

Figure 2 Étendue de la couche diluvienne de 1996



La planification initiale du projet prévoyait la tenue de deux ateliers publiques dont le premier a eu lieu en mai 1998,[3] et le deuxième en mai 2003 dans le cadre du 2e Symposium international sur les sédiments contaminés parrainé par l'American Society for Testing and Materials (ASTM) ainsi que par le Société canadienne de géotechnique (SCG), la Société canadienne de génie civil et par le Chapitre Saint-Laurent de la SETAC (Society for Environmental Toxicology and Aquatic Chemistry). L'atelier de 1998 était de nature générale et a permis d'intégrer la problématique des travaux de recherche du fjord dans l'ensemble des travaux et des problématiques identifiées du coté terrestre. La session spéciale sur le projet Saguenay post-

[3] Les comptes rendus sont disponibles sur le site Web :
www.ocipep.gc.ca/research/resactivites/natHaz/saguenay/1998_D001_f.asp

déluge de 2003, financé en partie par le BPIEPC, se voulait une occasion de présenter les conclusions de cinq années de recherche et de partager les résultats avec la communauté internationale.

Ce rapport vient donc présenter les résultats de cette session spéciale sur le projet Saguenay post-déluge et permet de souligner les diverses contributions et conclusions issues de travaux de recherche. Ces résultats seront aussi mis en lumière par rapport aux préoccupations du BPIEPC pour ce qui concerne principalement les aspects liés à la gestion des conséquences des désastres naturels ainsi qu'aux impacts sur les infrastructures essentielles (pêches, éco-tourisme, etc.).

2.0 Objectifs scientifiques du projet Saguenay post-déluge

Les objectifs scientifiques atteints par le projet concernent les éléments suivants :

- Fournir une réponse quant à l'efficacité de la couche de recouvrement;
- Identifier, d'une façon satisfaisante, les espèces vivantes du fjord du Saguenay qui peuvent être indicatrices de la restauration environnementale du site;
- Construire des modèles numériques ou conceptuels qui permettent d'évaluer et de prédire les réactions chimiques qui ont cours aux abords de la couche de recouvrement;
- Fournir un modèle de simulation numérique qui permet de prédire le transport des contaminants à travers la couche de recouvrement;
- Évaluer la résistance de cette couche à l'érosion et aux tremblements de terre;
- Rassembler ces divers outils et techniques en un canevas qui pourra être utilisé dans la planification, la réalisation et la prédiction de la performance de couches de recouvrement (naturelles ou artificielles) de sédiments contaminés.

3.0 Résultats scientifiques présentés lors de la session spéciale

Dans le cadre du 2^{e} Symposium international sur les sédiments contaminés, une session spéciale a été dédiée au projet Saguenay post-déluge. D'autres résultats ont déjà été publiés dans des articles scientifiques ou présentés lors de conférences spécialisées et sont regroupés dans la liste bibliographique. Dans le cadre spécifique de la session spéciale de 2003, la plupart des chercheurs principaux et d'autres chercheurs gouvernementaux sont venus présentés les conclusions de leurs travaux. Au total, il y a eu 17 présentations dont 15 orales et 2 sous la forme d'affiches. La liste qui suit donne les titres des différentes présentations, et les auteurs, dans l'ordre où elles ont été présentées. La première correspond à la conférence invitée de monsieur Émilien Pelletier. Les résumés de tous les articles de la session sont fournis à l'Annexe A.

3.1 Présentations orales

1. L'origine et l'efficacité d'une couche de recouvrement catastrophique déposée sur des sédiments contaminés dans le fjord du Saguenay (Québec).; Pelletier, É., Desrosiers, G., Locat, J., Mucci, A., and Tremblay, H.

2. La réalisation du projet Saguenay post-déluge : un projet unique avec des gens exceptionnels; Locat, J., Tremblay, H., Galvez-Cloutier, R., Desrosiers, G., Gagné, J.-P., Gratton, Y., Hill, P., Konrad, J.-M., Leroueil, S., Long, B., Hilaire-Marcel, C., Mucci, A., Pelletier, E., Simpkin, P., and de Vernal, A..
3. Évolution des peuplements benthiques après la crue éclair de 1996 dans la Baie des Ha! Ha!, Fjord du Saguenay (Québec); Desrosiers, G., Gonon, M., de Montety, L., Pelletier, É., Nozais, C., Michaud, E., Stora, G., Long, B., Tremblay, H., and Locat, J.

4. Résultas de faisceaux multiples, données sédimentologiques et géotechniques du Projet du Saguenay; Urgeles, R. and Locat, J.

5. Rétention des métaux lourds de la couche de sédiments dans la rivière Saguenay après le déluge de 1996; Galvez-Cloutier, R., Muris, M., Locat, J., and Bourg, C.

6. Devenir des polluants organiques persistants (POP) dans les sédiments de la Baie des Ha! Ha! suite au déluge de 1996; Lebeuf, M., Noël, M., and Trottier, S.

7. Caractérisation d'une couche de sédiments d'un déluge catastrophique : Signatures géologique, biologique et géochimique; Tremblay, H., Desrosiers, G., Locat, J., Mucci, A., and Pelletier, É.

8. Mesures par canal *in situ* de l'érosion du sédiment dans le fjord du Saguenay (Québec, Canada); Moreau A-L., Locat J., Hill P., Long, B., and Ouellet, Y.

9. Tracer la mobilité des métaux dans les sédiments à la suite d'un dépôt catastrophique; Mucci, A., Guignard, C., and Bernier, G.

10. Les facteurs qui influencent la migration des contaminants dans les sédiments du fjord du Saguenay : Analyse numérique de sensibilité; Dueri, S. and Therrien, R.

11. Surveillance de la provenance, de la réactivité et du temps de résidence des particules en suspension dans les milieux en transition à l'aide d'isotopes Th (234Th, 232Th, 230Th, 228Th) – Exemple du fjord du Saguenay (Québec); Poulin, P., Ghaleb, B., Hillaire-Marcel, C. and Mucci, A.

12. Propriétés physiques, magnétiques, sédimentologiques, géochimiques, faciès isotopiques et micropaléontologiques des couches rapidement déposées dans le fjord du Saguenay au Québec : de 7200 cal avant la couche d'inondation de1996 AD; St-Onge, G., Bilodeau, G., de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., Leduc, J., Mucci, A., Savard, J., Zhang, D., Mulder, T., Piper, D., Stoner, J.

13. Une ré-évaluation complète des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) dans les sédiments du fjord du Saguenay (Québec); Pelletier, É., Côté, N., Curtosi, A., and St-Louis, R.

14. Une extraction sélective des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) des sédiments contaminés à l'aide d'un agent de surface de forte masse moléculaire; Barthe, M. and Pelletier, E.

15. Cinétique et mécanismes de séquestration des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) en eau douce et en dépôt marin; Brion, D. and Pelletier, E.

3.2 Session d'affiches

- Comportement des HAP de fortes masses moléculaires dans la nouvelle couche de sédiments de la Baie des Ha! Ha! (Fjord du Saguenay); Pelletier, É. and Desbiens, I.

- Contributions du projet Saguenay Post-Deluge à la conception des couches de recouvrement; Tremblay, H. and Locat, J.

3.3 Autres documents scientifiques

Dans le cadre du 2^{e} Symposium international sur les sédiments contaminés, deux documents contenant le recueil des articles et résumés allongés ont été publiés. Il s'agit des documents suivants :

- Locat, J., Galvez-Cloutier, R., Chaney, R., and Demars, K. (Editors), 2003. Les sédiments contaminés : Caractérisation, évaluation, atténuation, restauration et rendement de la stratégie de gestion. *American society for Testing and Materials, Special Technical Publication 1442*, 321 p.

- Tremblay, H., Locat, J., and Galvez-Cloutier, R., (éditeurs) 2003. Transaction du 2e Symposium International sur les Sédiments Contaminés, Québec, Mai 2003. Cd-rom.

Au total, ces deux documents contiennent plus de 90 articles complets et résumés allongés sur le thème des sédiments contaminés.

4.0 Retombées scientifiques de la recherche

En plus de rencontrer les objectifs énoncés plus haut, le projet a aussi eu des retombées scientifiques telles que :

- Établissement d'une nouvelle référence (couche de 1996) permettant d'identifier beaucoup plus précisément les apports post-1996 en contaminants au fjord du Saguenay.

- Détermination des conditions optimales (épaisseur minimale de la couche qui peut bloquer la migration chimique et biologique des substances toxiques piégée) pour un éventuel recouvrement d'une couche sédimentaire contaminée (capping) par une couche de sédiment propre en zone marine profonde. Ces données pourraient trouver une application immédiate dans la rémédiation dans la baie des Anglais à Baie-Comeau.

- Données uniques et diversifiées regroupées dans une base de données interactive sur internet.

- Caractérisation des indicateurs de récupération environnementale tant géochimique, mécanique que biologique.

- Élaboration d'outils de planification et de conception d'une couche de recouvrement de sédiments contaminés.

- Utilisation du EM1000 et EM3000 pour cartographier et faire le suivit des couches de recouvrement.

4.1 Considérations sur les impacts marins et côtiers du déluge de juillet 1996

Les différents travaux qui ont été réalisés dans la partie amont du Saguenay à la suite du déluge de juillet 1996 nous permettent de faire quelques observations sur les impacts actuels et futurs du déluge du Saguenay sur l'écosystème marin et les infrastructures côtières.

4.1.1 Milieu marin

Pour ce qui est du milieu marin, le déluge du Saguenay a mis en place une couche de recouvrement qui a momentanément grandement perturbé la faune benthique, à un point tel qu'elle avait presque complètement disparue de plusieurs secteurs de la Baies des Ha! Ha! et du Bras Nord. Par contre, nos études ont clairement démontré que la réhabilitation de la faune

benthique a été très rapide puisqu'en moins de deux années, la plupart des stations d'études montraient un retour à un niveau d'occupation semblable à ce qui existait avant le déluge.

Les diverses études ont permis de vérifier l'hypothèse posée au départ laquelle considérait que la couche diluvienne de juillet 1996 agirait comme couche de protection efficace contre la migration des contaminants provenant des sédiments antérieurs au déluge de juillet 1996.

L'analyse des risques naturels dans la région à aussi indiqué qu'il faudrait un séisme d'une magnitude de 7 et plus pour déstabiliser la couche de 1996, mais cela se ferait dans des secteurs limités.

À cause de la stabilisation mécanique (consolidation) et biologique (bioturbation), la couche de recouvrement est de plus en plus résistante, particulièrement dans la Baie des Ha! Ha!, à l'érosion et les courant actuels normaux ne réussissent pas à l'éroder. Par contre, il est aussi important de noter que le milieu marin du Bras Nord est beaucoup plus dynamique. Nos études indiquent qu'il y a eu des secteurs du Bras Nord où il y a eu érosion par de forts courants provenant de la rivière Saguenay, avec une re-déposition plus en aval. Ainsi, la performance même de la couche de 1996 est plus difficile à mettre en évidence dans ce secteur.

La performance à long terme de la couche diluvienne de 1996, dans son ensemble, va donc dépendre de l'activité sismique future qui est le seul facteur déclenchant qui peut mobiliser de grandes surfaces. Plus localement, l'ancrage des gros navires au large du quai de La Baie pourrait aussi, à la longue, perturber la couche de surface.

Il apparaît donc des diverses études réalisées que le milieu aquatique et sédimentaire ressort de ce désastre en meilleure condition qu'avant. Au niveau du fjord, l'évaluation des conséquences de la catastrophe du déluge de 1996 a permis de souligner une amélioration de la qualité du milieu marin. Ainsi, la source de contaminants provenant de la Baie des Ha! Ha! est en bonne partie confinée sous la couche de 1996. De ce fait, la qualité de l'eau ainsi que de la faune benthique devraient soutenir le développement des infrastructures associées à cette région du fjord, comme la pêche blanche, les activités de récréation et toute autre industrie qui utilise le plan d'eau.

4.1.2 Milieu côtier

Le milieu côtier a été affecté par le déluge surtout par l'accumulation de sédiments et de débris provenant de l'érosion des rivières. On peut noter en particulier le remplissage de la marina de Grande Baie.

L'apport rapide de sédiments a contribué à pousser plus au large la bordure du delta des rivières, principalement celui de la rivière des Ha! Ha!. L'accumulation rapide des sédiments à aussi favoriser le développement de zones d'instabilités. Ces secteurs seront vraisemblablement plus à risque lors d'un séisme important (plus de 7) si l'épicentre se situait dans le secteur (voir la figure 4).

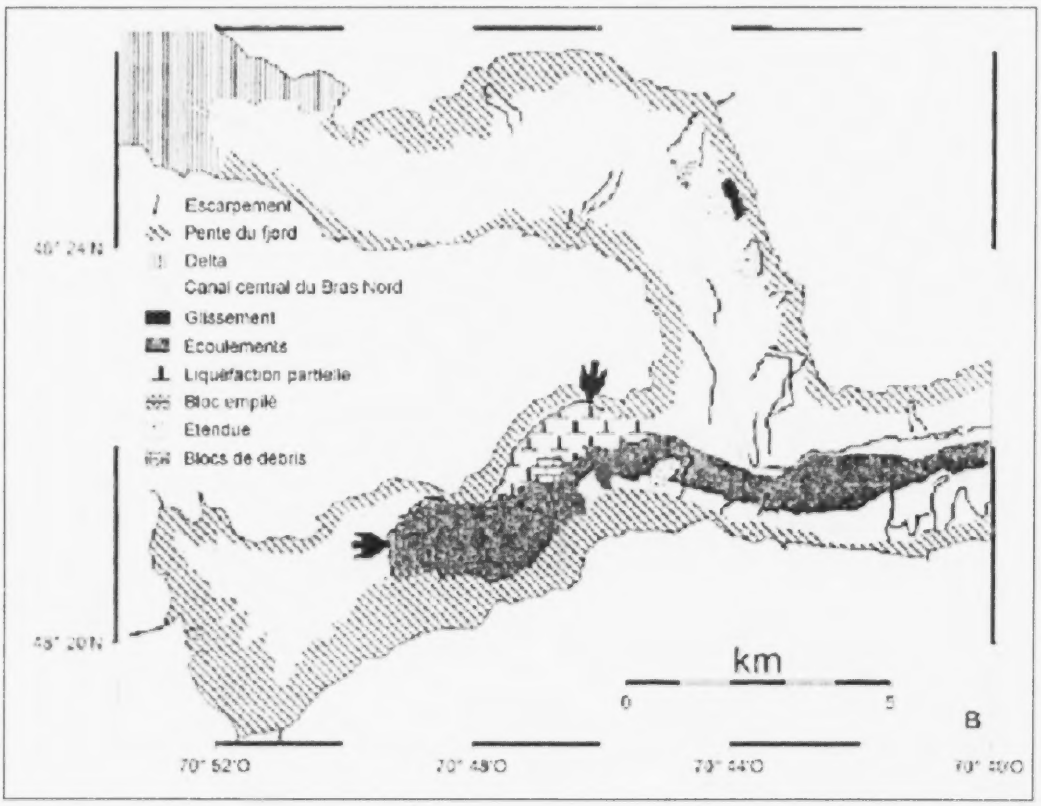
Les travaux de recherche portant sur la réponse des sédiments du Saguenay suite à un évènement sismique ont permis de mettre en évidence les indications morphologiques et analytiques qui

nous portent à croire que l'épicentre du séisme de 1663 pourrait se situer dans la région du Saguenay plutôt que dans celle de Charlevoix.

4.1.3 L'aléa glissements de terrain

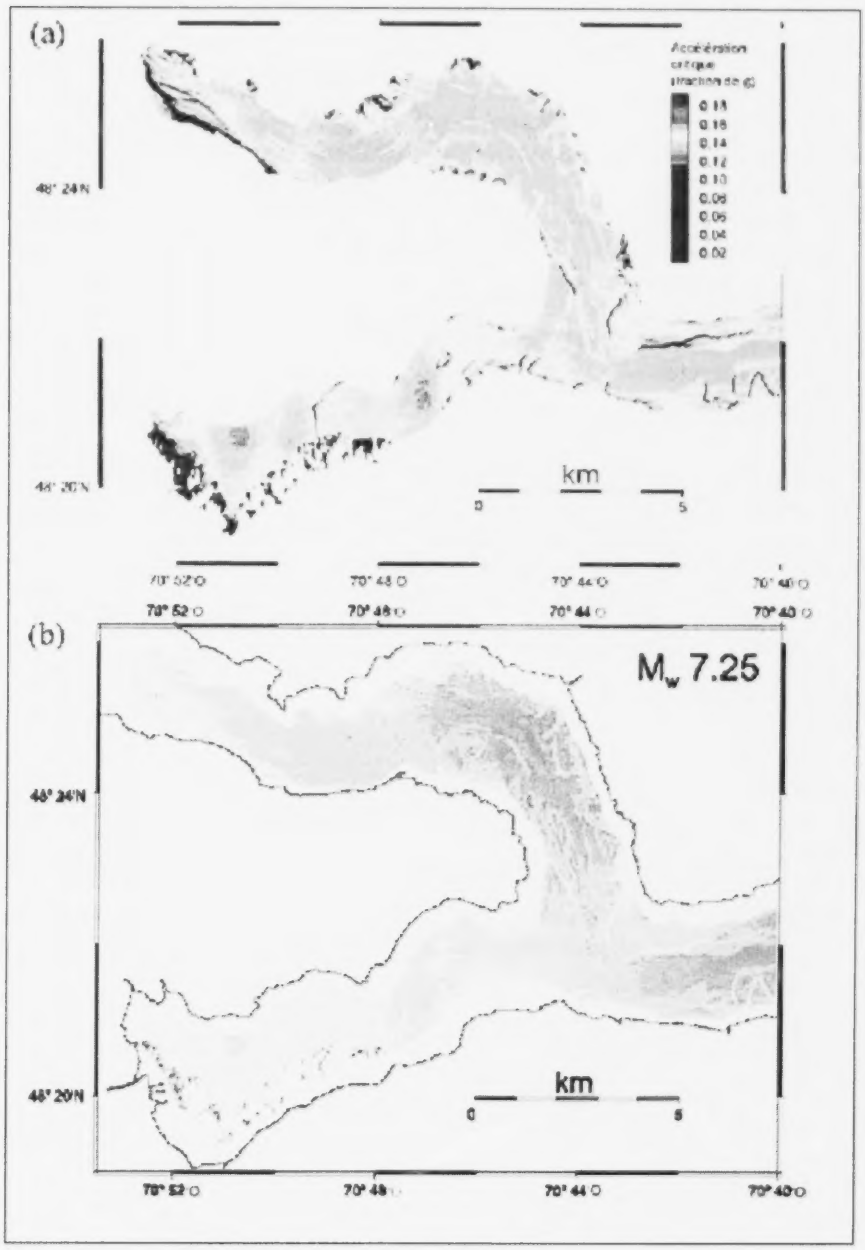
Les moyens mis en oeuvre pour étudier la couche diluvienne de 1996 et son devenir ont permis d'approfondir nos connaissances sur les aléas reliés aux glissements de terrain. Par exemple, l'analyse a permis l'inventaire des glissements de terrain situés dans la partie amont du fjord (figure 3) mettant en relief de larges mouvements de masse dont la plupart auraient été initiés par le séisme de 1663.

Figure 3 Étendue connue des glissements potentiellement reliés au séisme de 1663 (Urgeles *et al.*, 2002a).



L'analyse des données régionales sur les accélérations critiques ont été évaluées et comparées aux propriétés des couches superficielles du fjord du Saguenay afin d'évaluer les seuils d'accélération sismiques critiques pouvant provoquer des instabilités (figure 4a). À partir de cette analyse il a été possible de conclure que seul un séisme majeur de l'ordre de 7.0 et plus pourrait déstabiliser les sédiments superficiels et que les secteurs touchés seraient plutôt limités, comme l'indique la figure 4b.

Figure 4 Effets d'un séisme sur les sédiments de surface de la partie amont du fjord du Saguenay (a) accélération critique requise pour une instabilité, et (b) zone d'instabilité potentielle pour un séisme ayant une intensité de 7.3 (modifié d'après Urgeles *et al.*, 2002a).



5.0 Conclusion sur les impacts marins et côtiers du Déluge du Saguenay

À partir des résultats des travaux de recherche présentés à la session spéciale sur le Projet Saguenay Post-déluge du 2e Symposium international sur les sédiments contaminés, nous pouvons conclure sur les impacts sur les environnements marins et côtiers et proposer quelques recommandations de priorités de recherche futures dans la région du Saguenay.

5.1 Impacts sur les milieux marins et côtiers

Les études de la partie amont du fjord du Saguenay nous permettent de conclure que :

1. La couche diluvienne de 1996, bien que répartie inégalement, agit comme une couche de protection efficace contre la migration des contaminants situés dans les sédiments sous-jacents.

2. L'impact du déluge sur la faune benthique a été bénéfique en fournissant un écran de protection limitant l'accès de ces organismes aux contaminants, ce qui devrait à long terme réduire le niveau de contaminants dans la chaîne alimentaire des animaux qui s'y nourrissent.

3. Les dommages côtiers sont limités aux zones à proximité des deltas des rivières.

4. Les infrastructures locales et régionales associées à l'utilisation et à l'exploitation du milieu aquatique du fjord y retrouvent, après le déluge de 1996, des conditions encore plus favorables tant du point de vue de la qualité de l'eau que de la faune benthique.

Il est possible de rapidement déployer des équipes de recherche permettant d'évaluer l'impact de catastrophes naturelles sur le milieu marin grâce à la mise en commun et au développement d'outils tant du domaine de la chimie, de la biologie, de la géotechnique que de la géophysique. Ceci s'avère très pertinent, également dans le contexte de la protection civile.

5.2 Priorités de recherche futures dans la région du Saguenay

Les travaux qui ont été faits dans le cadre du Projet Saguenay post-déluge ont permis aux chercheurs d'établir des priorités de recherche futures qui sont :

1. Procéder à un monitoring régulier du suivi de la stabilité des talus situés au droit des deltas actuels, surtout celui de la rivière des Ha! Ha!.

2. Évaluer la paléo-sismicité de la région afin de mieux connaître et intégrer l'aléa sismique dans l'évaluation du risque tant marin que côtier.

3. Évaluer l'impact des navires sur la re-mobilisation des sédiments contaminés.

Ces activités de recherche aideraient les communautés à connaître les risques présents de la région et les endroits les plus susceptibles, ainsi que les éléments déclencheurs. Les effets d'un autre événement tel le déluge du Saguenay pourraient possiblement être atténués.

Bibliographie

Publications dans des revues scientifiques

Crémer, J.-F., Long, B., Desrosiers, G., de Montety, L., Locat, J. 2002. Application de la scanographie à l'étude de la densité des sédiments et à la caractérisation des structures sédimentaires : exemple des sédiments déposés dans la rivière Saguenay (Québec, Canada) après la crue de juillet 1996. Can. Geotech. J., Vol. 39, pp. 440-450.

Deflandre B. and Gagné, J.-P.. 2001. Determination of dissolved organic carbon (DOC) in nanoliter samples using UV spectroscopy. Water Research, 35: 3057-3062.

Deflandre, B., Mucci, A., Gagné, J.-P., Guignard, C. and Sundby, B. 2001. Early diagenetic processes in coastal marine sediments disturbed by a catastrophic sedimentation event. Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 66, No. 14, pp. 2547-2558.

de Montety, L., Long, B., Desrosiers, G., Crémer, J. ., Locat, J. et Stora, G. 2002. Utilisation de la scanographie pour l'étude des sédiments et des structures biogènes d'un milieu fortement perturbé : la baie des Ha! Ha!, Fjord du Saguenay, Québec, Canada. Journal canadien des Sciences de la Terre (accepté).

Dueri, S., R. Therrien, J. Locat. Numerical simulation of the migration of dissolved heavy metals through a subaqueous capping layer, accepté, Journal of Environmental Engineering and Science

Dueri, S. and Therrien, R. 2003. "Factors Controlling Contaminant Transport Through the Flood Sediments of the Saguenay Fjord: Numerical Sensitivity Analysis," Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance, ASTM STP 1442, J. Locat, R. Galvez-Cloutier, R. C. Chaney, and K. R. Demars, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, (sous presse)

Galvez-Cloutier, R., Muris, M., Locat, J., and Bourg, C.2003.Retention of Heavy Metals in the Post '96 Flood Sediment Layer Deposited in the Saguenay River, Quebec, Canada. *ASTM STP 1442*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (sous presse).

Leduc, J., Bilodeau, G., de Vernal, A. et Mucci, A. 2002. Distribution of benthic foraminiferal populations in surface sediments of the Saguenay Fjord, before and after the 1996 flood. Palaeogeogr., Palaeclimatol., Paleoecology, 180, 207-223.

Michaud, E., Desrosiers, G., Long, B., de Montety, L., Crémer, J.-F., Pelletier, E., Locat, J., Gilbert, F. and G. Stora. 2002. Use of axial tomography to follow temporal changes of benthic communities in an unstable sedimentary environment : (Ha! Ha! Bay, Saguenay Fjord). Jour. Exp. Mar. Biol. And Ecol. (in press).

Moreau, A-L., Locat, J., Hill, P., Long, B., and Ouellet, Y., 2003."In situ Flume Measurements of Sediment Erodability in Saguenay Fjord (Quebec, Canada)," Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance, ASTM STP 1442, J. Locat, R. Galvez-Cloutier, R. C. Chaney, and K. R. Demars, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA,(sous presse).

Mucci, A., Guignard, C., and Boudreau, B. 2003. Diagenetic mobility of trace elements in sediments covered by a flash flood deposit: Mn, Fe, and As. Applied Geochem. (sous presse).

Mucci, A., Richard, L.-P., Lucotte, M. and Guignard, C. 2000. The differential geochemical behavior of arsenic and phosphorus in the water column and sediments of the Saguenay Fjord estuary, Canada. Aquatic Geochemistry, **6:** 1-32.

Pelletier, E., Mostajir, B., Roy, S., Gosselin, M., Gratton, Y., Chanut, J.-P., Belzile, C., Demers, S., and Thibault, D. 1999. Crue éclair de julliet 1996 dans la région du Saguenay (Québec). 1. Impacts sur la colonne d'eau de la baie des Ha! Ha! et du fjord du Saguenay. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 56, 2120-2135.

Pelletier, E., Desrosiers, G., Locat, J., Mucci, A., and Tremblay, H. 2003 The Origin and Behavior of a Flood Capping Layer Deposited on Contaminated Sediments of the Saguenay Fjord (Quebec). Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance, ASTM STP 1442, J. Locat, R. Galvez-Cloutier, R. C. Chaney, and K. R. Demars, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA (sous presse)

Pelletier, E., Deflandre, B., Nozais, C., Tita, G., Derosiers, G., Gagné J.-P., and Mucci, A. 1999. Crue éclair de julliet 1996 dans la région du Saguenay (Québec). 2. Impacts sur les sédiments et le biote de la baie des Ha! Ha! et du fjord du Saguenay. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 56, 2136-2147.

Saulnier, I. et Mucci, A. (2000). Trace metal remobilization following the resuspension of estuarine sediments : Saguenay Fjord, Canada. Applied Geochemistry **15** : 191-210

St-Onge, G. et Hillaire-Marcel, C. 2001. Isotopic constraints on sedimentary inputs and organic carbon burial rates in the Saguenay Fjord, Quebec. Marine Geology, Vol. 176, pp. 1-22.

St-Onge, G., Leduc, J., Bilodeau, G., de Vernal, A., Devillers, R., Hillaire-Marcel, C., Loucheur, V., Marmen, S., Mucci, A. et Zhang, D. 1999. Caractérisation des sédiments récents du fjord du Saguenay à partir de traceurs physiques, géochimiques, isotopiques et micropaléontologiques. Géographie physique et Quaternaire, 53 : 339-350.

St-Onge, G., Mulder, T., Piper, D.J.W., Hillaire-Marcel, C. et Stoner, C. soumis. Earthquake and flood-induced turbidites in the Saguenay Fjord (Québec) : a Holocene paleoseismicity record. Quaternary Science Reviews.

Tita, G., Desrosiers, G. and Vincx, M.. 2000. New type of hand-held corer for meiofaunal sampling and vertical profile invertigation : a comparative study. Journal of the Marine Biological Association, U. K. 80, 171-172.

Tita, G., Desrosiers, G., Vincx, M., Gagné, J.-P. and Locat, J. 2001. Diversity and vertical distribution of nematode assemblages : the Saguenay fjord (Québec, Canada). Cahiers de Biologie Marine, Vol. 42, pp. 263-274.

Tremblay, H., Desrosiers, G., Locat, J., Mucci, A., and Pelletier, É. 2003. "Characterization of a Catastrophic Flood Sediment Layer: Geological, Geotechnical, Biological and Geochemical Signatures," Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance, ASTM STP 1442, J. Locat, R. Glavez-Cloutier, R. C. Chaney, and K. R. Demars, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, (sous presse).

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. & Gagné, J.-P.. 2002. Effects of temperature, salinity and dissolved organic matter on the sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to estuarine particles. Environmental Science and Technology, in correction (soumis).

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. & Gagné, J.-P.. 2002. Geosorbents lipid content as a cause of nonlinear sorption of polycyclic aromatic hydrocarbon. Environmental Science and Technology, (en correction).

Tremblay, L.; Gagné, J.-P & Brindle, J.-R. 2001. Analysis and geochemical study of sedimentary humic substances using DRIFT spectroscopy. In: Understanding and Managing Organic Matter in Soils, Sediments and Waters; Swift, R. S. and Spark, K. M. (Eds.), IHSS, St. Paul, MN, pp. 107-114.

Tremblay, L. & Gagné, J.-P., 2002. Fast Quantification of Humic Substances and Organic Matter by Direct Analysis of Sediments Using DRIFT Spectroscopy. Analytical Chemistry, 74, 2985-2993.

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. &.Gagné, J.-P. 2003. Sorption of PAHs to natural sorbents: impacts of humic and lipid fractions. In: Humic Substances: Nature's Most Versatile Materials; Ghabbour, E.A. and Davies, G. (Eds.), Taylor and Francis Inc., New York, (in press).

Urgeles, R., Locat, J., Lee, H. et Martin, F. 2002a. The Saguenay Fjord, Québec, Canada : Integrating marine geotechnical and geophysical data for spatial seismic slope stability and hazard assessment. Marine Geology. Vol. 185, pp. 319-340.

Urgeles, R., Locat, J., Schmitt, T., Hughes Clarke, J.E. 2002b. The July 1996 flood deposit in the Saguenay Fjord, Quebec, Canada : implication for sources of spatial and temporal backscatter variations. Marine Geol., Vol. 184, pp. 41-60.

Comptes rendus de conference

Barthe, M. and E. Pelletier, 2003. Selective extraction of PAHs from contaminated sediments using a large volume neutral surfactant. *Proc. 2nd Intern. Symp. on Contaminated Sediments*, Québec, (sous presse).

Crémer, J.F., Long, B., Locat, J. et Desrosiers, G. 2000. Application de la tomodensitométrie à l'étude de la densité des sédiments et à la caractérisation des structures sédimentaires : exemple des sédiments déposés dans le Saguenay après la crue de juillet 1996. *Proc. of the 53rd Can. Geot. Conf., Montreal*, pp. 153-159.

Deflandre B., Gagné, J.-P. & Desrosiers, G. 1999. Évolution géochimique des sédiments du Fjord du Saguenay (Québec, Canada) depuis la perturbation environnementale de juillet 96. Déluge du Saguenay de 1996, *numéro spécial Carrefour des Sciences de la Terre*, 23: 6-12.

Deflandre, B., Gagné, J.-P., Sundby B., Mucci, A., Guignard, C., Anschutz, P. 2000. The 1996 flood event : Disruption of the ongoing diagenesis of Saguenay fjord sediments. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal*, pp. 117-122.

De Montety, L., Long, B., Desrosiers, G., Crémer, J.F. et Locat, J. 2000. Quantification des structures biogènes en fonction d'un gradient de perturbation dans la Baie des Ha! Ha! à l'aide de la tomodensitométrie axiale. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal*, pp. 131-135.

Desrosiers, G., Gonon, M., de Montety, L., Pelletier, E., Nozais, C., Michaud, E., Stora, G., Long, B., Tremblay, H. et Locat, J. 2003. Évolution des peuplements benthiques après la crue éclair de 1996 dans la baie des Ha! Ha!, Fjord du Saguenay (Québec). *2nd Intern. Symp. on Contaminated Sediments*, Québec, (sous presse).

Kammerer, E., Hughes Clarke, J.E., Locat, Doucet, N., and Godin, A. 1998. Monitoring temporal changes in seabed morphology and composition using multibeam sonars: a case study of the 1996 Saguenay River floods. *Proc. of the Canadian Hydrographic Conference 1998*, Victoria, Canada, 450-461.

Locat, J., and Sanfaçon, R. 2000. Multibeam surveys: A major tool for Geosciences. *Proc. of the Canadian Hydrographic Conference 2000*, Montreal, Québec, Canada, CD-ROM.

Locat, J., Urgeles, R., Schmitt, T., Houareau, L., Martin, F., Hill, P., Long, B., Simpkin, P., Kammerer, E., Sanfaçon, R. 2000. The morphological signature of natural disasters in the Upper Saguenay Fjord area, Québec, Canada. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal*, pp. 109-116.

Locat, P., Locat, J., Leroueil, S., Urgeles, R., Hart, B. et Long, B. Caractérisation préliminaire du glissement sous-marin de la Pointe-du-Fort, Fjord du Saguenay, Québec, Canada. *Proc. of the 54th Canadian Geotechnical Conference*, Galgary, pp.752-759.

Martin, F., Konrad, J.-M., Locat, J., Locat, P., Urgeles, R., and Lee, H. 2001. Caractéristiques géotechniques et analyse du potentiel de liquéfaction des sédiments récents et post-glaciaires du fjord du Saguenay, Québec (Canada). *Proc. of the 54th Canadian Geotechnical Conference*, Galgary, pp. 776-783.

Maurice, F., Locat, J. et Leroueil, S. 2000. Caractéristiques géotechniques et évolution de la couche de sédiment déposée lors du déluge de 1996 dans la Baie des Ha! Ha! (fjord du Saguenay, Québec). *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Montreal, pp. 123-130.

Michaud, E., Long, B., Crémer, J.-F., Desrosiers, G. et De Montety, L. 2001. Les phases de construction deltaïques, influence d'un apport catastrophique. *Conf. Can. sur le littoral* 2001, Québec. pp. 533-547.

Moreau, A.-L., Amos, C., Locat, J., Hill, P., Ouellet, Y, Long, B. et Naaim, M. 2000. Étude expérimentale de l'érodabilité des sédiments déposés dans le fjord du Saguenay (Québec) lors du déluge de 1996. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Montreal, pp. 177-183.

Mucci, A., Guignard, C. and Olejczuyk, P. 2000. Mobility of metals and As in sediments following a large scale episodic sedimentation event. *Proc. of the 53rd Canadian Geotechnical Conference*, p.169-176.

Pelletier, E. et I. Desbiens, 2003. Behaviour of high molecular weight PAHs in the new sediment layer of the baie des Ha!Ha!. Proc. 2nd International Symposium on Contaminated Sediments, Québec, (sous presse).

Schmitt, T., Locat, J., Kammerer, E., Hill, P., Long, B. Clarke, J.H. and Urgeles, R. 2000. Analysis of the evolution of the reflectivity of sediments settled during the 1996 flood in the Saguenay Fjord, usig the SIMRAD EM1000 multibeam sonar. *Proc. of the Canadian Hydrographic Conference 2000*, Montreal, Québec, Canada, CD-ROM.

St-Onge, G. et Hillaire-Marcel, C. 2000. Inventaire des couches accidentelles récentes dans le fjord du Saguenay à partir des propriétés physiques de carottes de forages. *Proc of the 53rd Canadian Geotechnical Conference,* Montreal, pp. 145-151.

Tremblay, H., Locat, J. et Urgeles, R. 2001. Géodynamique littorale de la couche diluvienne de 1996, Baie des Ha! Ha!, fjord du Saguenay, Québec, Canada. *Conf. Can. sur le littoral 2001*, Québec. pp. 507-522.

Tremblay, H., Locat, J., Mucci, A. and Pelletier, E. 2001. The efficiency of a catastrophic capping layer deposited in the Saguenay Fjord during the flood of 1996, Quebec. *Proc. of the 54th Canadian Geotechnical Conference*, Galgary, pp. 760-767.

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. & Gagné, J.-P. 2002. Effects of lipids on the nonlinear sorption of phenanthrene to sedimentary humic substances. *Proceedings of the International Humic Substances Society Twentieth-Anniversary Conference*, July 2002, Boston, pp. 443-445.

Tremblay, L.; Kohl, S. D.; Rice, J. A. & Gagné, J.-P. 2002. Sorption of PAH to estuarine humic substances and impacts of temperature and salinity variations. *Proceedings of the International Humic Substances Society Twentieth-Anniversary Conference*, July 2002, Boston, pp. 155-157.

Urgeles, R., Locat, J., Lee, H., Martin, F., Konrad, J.-M. 2001. The Saguenay Fjord : Integrating marine geotechnical and geophysical data for spatial slope stability hazard analysis. *Proc. of the 54th Canadian Geotechnical Conference*, Galgary, pp. 768-775.

Annexe A – Résumés reliés à la session spéciale sur le projet Saguenay Post-déluge

Cette annexe contient les résumés de tous les articles et affiches reliés à la session spéciale sur le projet Saguenay post-déluge. Les résumés allongés et/ou les articles complets peuvent se retrouver soit dans le STP-1442 ou dans les Actes du Symposium, selon le cas.

Présentations orales

L'origine et l'efficacité d'une couche de recouvrement catastrophique déposée sur des sédiments contaminés dans le fjord du Saguenay (Québec)

Emilien Pelletier[1], Gaston Desrosiers[1], Jacques Locat[2], Alfunso Mucci[3] and Hélène Tremblay[2]
[1] Institut des sciences de la mer (ISMER), Université du Québec à Rimouski, Rimouski (Que) Canada
[2] Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec (Que), Canada
[3] Department of Earth & Planetary Sciences, McGill University, Montreal (Que) Canada

ASTM STP 1442

RÉSUMÉ : La section amont du fjord du Saguenay a subi les effets catastrophiques d'un déluge en juillet 1996. Des sédiments contaminés ont été recouverts par une couche vaseuse de sédiments post-glaciaires à très faible taux de traces métalliques (Cu, Cd, Cr, Hg, Pb, et Zn) et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). La couche de recouvrement a été caractérisée par des essais géotechniques et géochimiques et sa reconstitution biologique a été contrôlée annuellement à l'aide d'échantillonnages de la macrofaune. La consolidation de la couche s'est effectuée en trois mois. On a observé une forte prédominance de Cirratulidae et de Ampharetidae dépositivores à la plupart des stations d'observation au cours des deux ou trois premières années, puis par après, on remarqua la présence d'annélides carnivores tels que les Lumbrineridae et les Nephtidae. Ces espèces témoignent d'une bonne recolonisation de l'habitat de la Baie des Ha! Ha!. La stabilité de la pente de la couche de recouvrement est jugée très bonne sauf dans le cas des secteurs deltaïques limités du fond de la Baie des Ha! Ha!. La nouvelle couche s'est révélée efficace en tant que recouvrement protecteur servant à isoler les sédiments contaminés des eaux profondes de la rivière Saguenay. Bien que du manganèse et du fer soient en remobilisation alors que la nouvelle couche devenait anoxique, le mercure, l'arsenic et les PAH ne traversaient que peu la couche du déluge.

La réalisation du projet Saguenay post-déluge : un projet unique avec des gens exceptionnels

Jacques Locat[1], Hélène Tremblay[1], Rosa Galvez-Cloutier[1], Gaston Desrosiers[2], Jean-Pierre Gagné[2], Yves Gratton[3], Philip Hill[4], Jean-Marie Konrad[1], Serge Leroueil[1], Bernard Long[3], Claude Hilaire-Marcel[5], Alfonso Mucci[6], Émilien Pelletier[2], Peter Simpkin[7], Anne de Vernal[5]
[1] Département de Géologie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada
[2] Institut des Sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada
[3] INRS-ETE, Québec, Canada
[4] Commission géologique du Canada, région du Pacifique
[5] Université du Québec à Montréal
[6] Department of Earth & Planetary Sciences, McGill University, Montreal (Que) Canada
[7] Simpkin Inc

RÉSUMÉ : Le projet Saguenay post-déluge a été réalisé au cours des années 1997 à 2003. Il a rassemblé plusieurs chercheurs qui ont du évaluer la performance de la couche de 1996 comme barrière à la migration des contaminants et aussi développé des outils d'évaluation et de monitoring. Après les cinq années de recherche, nous pouvons conclure que cette couche est efficace et qu'elle devrait résister à la plupart des phénomènes naturels, sauf à un séisme majeur, mais là encore les perturbations seraient limitées. Ce travail a nécessité la participation de plusieurs organismes universitaires et gouvernementaux et sa réalisation aura permis la formation ou la participation de plus de 42 étudiants gradués dont 17 au doctorat. L'ensemble des travaux qui ont été réalisés sont le fruit non seulement des résultats provenant directement du projet mais aussi des connaissances antérieures qui ont permis de réduire énormément les coûts du projet dont le coût total est estimé à 1.3 millions de dollars. Les retombées indirectes de ces travaux sont la mise au point d'une base de données scientifique, mais surtout une connaissance accrue des processus actifs et la reconnaissance mondiale de ce magnifique laboratoire naturel.

Évolution des peuplements benthiques après la crue éclair de 1996 dans la Baie des Ha ! Ha !, Fjord du Saguenay (Québec)

Gaston Desrosiers[1], Matthieu Gonon[1], Laure de Montety[1], Émilien Pelletier[1], Christian Nozais[1], Emma Michaud[2], Georges Stora[2], Bernard Long[3], Hélène Tremblay[4], Jacques Locat[4]
[1] Institut des Sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada
[2] Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie, Université de la Méditerranée, COM, Campus de Luminy, Marseille, France
[3] INRS-ETE, Québec, Canada,
[4] Département de Géologie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada

RÉSUMÉ : Suite à la crue éclair qui s'est produite dans la région du Saguenay en 1996, le fond de la baie des Ha! Ha! a été recouvert par une grande quantité de sédiments, sous la forme d'une couche d'épaisseur décroissante de la tête de la baie vers son embouchure. Les perturbations observées sur la macrofaune benthique résultant de cet événement ont été plus importantes pour les stations situées à proximité de l'embouchure de la rivière Ha! Ha!. Une étude portant sur 5 stations de référence localisées sur une radiale durant 6 ans a permis de démontrer une

recolonisation des sédiments par les annélides polychètes, avec une succession d'espèces caractéristiques entre les stations situées à la tête de la baie par rapport aux autres stations, en fonction de la décroissance de la nouvelle couche de dépôt. La macrofaune benthique à la station 2, est majoritairement composée d'espèces dont le régime trophique les classent comme des déposivores de surface tandis que pour les autres stations (5, 7, 9, 13) on retrouve des déposivores de subsurface (*Scoloplos armiger*) et même des carnivores (*Lumbrinereis fragilis*). Cet isolement de la station 2 est renforcé par les études statistiques montrant que cette station suit une évolution significativement différente des autres stations localisées sur cette radiale.

Résultas de faisceaux multiples, données sédimentologiques et géotechniques du Projet du Saguenay

Roger Urgeles[1], Jacques Locat[2]
[1] GRC Geociències Marines, Departament d'Estratigrafia, Paleontología i Geociències Marines, Universitat de Barcelona, Campus de Pedralbes, 08028 Barcelona (Catalonia), Spain
[2] Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Ste.-Foy, Québec, Canada

RÉSUMÉ: En juillet 1996, une crue majeure dans la région du Saguenay a causé le transport et la déposition d'une grande quantité de sédiments dans le fjord du Saguenay, recouvrant les sédiments contaminés présents. Plusieurs levés multifaisceaux et campagnes d'échantillonnage ont été réalisés pour vérifier la capacité de recouvrement de la nouvelle couche de sédiments. Ces travaux montrent les effets de la couche de crue sur le fond du fjord et aussi l'existence d'anciens mouvements de masse. Néanmoins, une analyse dynamique de la stabilité des pentes a montré que les sédiments du fjord sont stables à l'intérieur de l'intervalle de récurrence des séismes majeurs. Les données de rétrodiffusion obtenues à partir des données multifaisceaux montrent également l'évolution de la couche de crue, qui représente l'élimination de la faune benthique et la recolonisation subséquente de la nouvelle couche par le benthos.

Rétention des métaux lourds de la couche de sédiments dans la rivière Saguenay après le déluge de 1996

Rosa Galvez-Cloutier[1], Myriam Muris[2], Jacques Locat[3], Cyril Bourg[2]
[1] Dept. of Civil Engineering. Laval University, Quebec, Canada
[2] Ecole Nationale de Travaux Public de l'État, Lyon, France
[3] Department of Geology, Laval University, Quebec, Canada

ASTM STP 1442

RÉSUMÉ: En juillet 1996, pendant un déluge, qui se reproduit tous les 50 ans, une nouvelle couche de sédiments composée de débris, de gravier et de matières fines, a été transportée et déposée sur une vieille couche de sédiments contaminés d'un mètre d'épaisseur, sur le fond du fjord de la rivière Saguenay et de la Baie des Ha! Ha!. Pendant la révolution industrielle, différentes industries telles que celles de la métallurgie, du plastique de l'aluminium et du papier ont déversé leurs déchets dans ces eaux, provoquant ainsi une forte contamination de l'eau et des sédiments. Cette contamination a restreint la pêche des poissons et des fruits de mer. Puisque la nouvelle couche se compose essentiellement de matière plus propre, le secteur montre des signes

importants indicateurs d'un environnement plus sain. Le gouvernement du Canada et des industries environnantes veulent évaluer les nouvelles possibilités du secteur et sa sécurité environnementale. À ce jour, les coûts de cette étude dépassent un million de dollars. Cette partie du projet du Saguenay cherchait à reconnaître et à évaluer les capacités de la nouvelle couche d'endiguer et de retenir les contaminants restants dans la couche inférieure. On porte une attention particulière au mercure et aux métaux lourds tels que : Pb, Zn, Cd, et le Ni et à leur distribution géochimique dans les matières absorbantes telles que l'argile, les oxydes, les carbonates et la matière organique. Le document présente la mission de reconnaissance et d'échantillonnage à bord du navire Alcide Horth, des descriptions de la contamination présentée en deux dimensions (longueur et profondeur), la distribution géochimique des métaux lourds sur la couche contaminée, la couche de transition et la nouvelle couche ainsi que l'évolution de leur rétention et de leur transfert. Un exposé et les relations avec les caractéristiques des sédiments communs tel que la grosseur des grains, la capacité d'échange cationique et l'aire de la surface y sont aussi présentés. L'extraction sélective séquentielle a été utilisée conjointement avec la microscopie électronique à balayage (MEB) pour étudier les espèces de métaux lourds.

Devenir des polluants organiques persistants (POP) dans les sédiments de la baie des Ha ! Ha ! suite au déluge de 1996

Michel Lebeuf, Michelle Noël et Steve Trottier
Institut Maurice-Lamontagne, Ministère des Pêches et des Océans, Québec, Canada

RÉSUMÉ: En juillet 1996, des pluies diluviennes ont entraîné des tonnes de sol dans le réseau hydrique de la région du Saguenay. Les secteurs de la baie des Ha! Ha! et du Bras Nord de la rivière Saguenay ont été parmi les plus affectés par cet événement. À certains endroits, des dépôts de sédiment atteignant une épaisseur de plus de 20 centimètres ont été observés. Cette catastrophe naturelle offre une opportunité exceptionnelle d'étudier le devenir des polluants organiques persistants (POP) enfouis sous les nouveaux sédiments. Dès 1997, une carotte de sédiment a été récoltée dans le secteur nord de la baie des Ha! Ha! dans le but de déterminer les niveaux et les patrons des POP dans les nouveaux et les anciens sédiments. Les mesures de contenu en eau et de l'activité du ^{210}Pb dans les différentes couches de sédiment ont permis d'estimer à environ 20 centimètres l'épaisseur de la couche de nouveaux sédiments déposés à cet endroit en 1996. Les concentrations de biphényles polychlorés (BPC) et de pesticides chlorés (OC) mesurées dans les nouveaux sédiments étaient environ dix fois moins élevées que les concentrations maximales observées dans les sédiments en place avant les événements de 1996. Par ailleurs, des campagnes d'échantillonnage en 1999 et 2000 ont permis de récolter de nouvelles carottes de sédiment dans le même secteur permettant ainsi de suivre les changements temporels de la distribution des BPC et OC dans les nouveaux et les anciens sédiments. Les résultats indiquent clairement qu'au cours de cette période, les POP étudiés sont demeurés immobiles dans les sédiments de la baie des Ha! Ha!. Ainsi, la couche de nouveaux sédiments éloigne et isole les POP de l'interface eau-sédiment et les rend moins accessibles aux organismes benthiques et au transfert dans la chaîne alimentaire.

Caractérisation d'une couche de sédiments d'un déluge catastrophique : Signatures géologique, biologique et géochimique

Hélène Tremblay[1], Gaston Desrosiers[2], Jacques Locat[1], Alfunso Mucci[3], Émilien Pelletier[2]
[1] Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Ste.-Foy, Québec, Canada
[2] Institut des Sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada
[3] Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, Montreal, Qc, Canada

ASTM STP 1442

RÉSUMÉ: En 1996, des pluies diluviennes sont tombées sur la région du Saguenay, au Canada, ce qui a entraîné une importante inondation et l'érosion d'une grande quantité de matière sédimentaire post-glaciaire. En conséquence, à peu près 20 millions de tonnes de sédiment ont été déposées dans la partie amont du fjord du Saguenay, recouvrant les sédiments contaminés récents d'une couche de matière relativement propre de 10 à 60 cm d'épaisseur. Cette couche causée par l'inondation présente plusieurs caractéristiques différentes de la couche des sédiments pré-inondation : une consistance et une résistance faibles, gorgée d'eau, l'absence d'organismes benthiques ou la présence de composantes géochimiques héréditaires. Dans cette étude, nous avons évalué les critères utilisés par les différents chercheurs pour l'identification les dépôts laissés par le déluge de 1996 et la comparaison de sa signature.
Par la suite, nous avons évalué la variabilité spatiale du dépôt et son effet sur l'interprétation des études temporelles.

Mesures par canal *in situ* de l'érosion du sédiment dans le fjord du Saguenay (Québec, Canada)

Ann-Laure Moreau[1], Jacques Locat[1], Phillip Hill[2], Bernard Long[3], Yvon Ouellet[4]
[1] Department of Geology and Geological Engineering, Laval University, Quebec, Canada,
[2] Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Sidney, B.C.
[3] INRS-ETE, Québec, Canada
[4] Civil Engineering department, Laval University, Quebec, Canada,

ASTM STP 144

RÉSUMÉ: L'érodabilité des sédiments superficiels dans le fjord du Saguenay au Québec a été étudiée à 14 sites pendant trois ans dans la Baie des Ha! Ha! Et dans le Bras Nord. Cette étude a été réalisée à l'aide d'un canal benthique, appelé *Miniflume*. Des études précédentes avaient montré que les caractéristiques des sédiments du fjord du Saguenay variaient considérablement lorsque observées à grande ou à petite échelles. Les contraintes tangentielles critiques et les taux d'érosion ont révélé cette variabilité par des contraintes tangentielles (τ_c) entre 0.06 et 0.44 Pa et des taux moyens d'érosion pour la phase totale d'érosion (E_{mean}) entre 3.4×10^{-4} et 1.25×10^{-5} $kg.m^{-2}.s^{-1}$. Les contraintes tangentielles et les taux mesurés étaient les mêmes que ceux d'autres études *in situ*. La variabilité des résultats est liée aux importantes variabilités spatiales de sédiments benthiques et non aux variabilités temporelles. L'identification des paramètres d'érosion (contraintes tangentielles critiques et les taux d'érosion) et de leur grande variabilité

constitue la première étape de la détermination du danger rattaché à la susceptibilité de l'érosion des sédiments du fjord du Saguenay.

Tracer la mobilité des métaux dans les sédiments à la suite d'un dépôt catastrophique

Alfonso Mucci, Constance Guignard, and Geneviève Bernier
Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, Montreal, Qc, Canada

RÉSUMÉ : A la suite de la crue éclair de juillet 1996, plusieurs millions de tonnes métriques de sédiments post-glaciaires furent érodées et transportées dans le fjord du Saguenay (Québec, Canada). Des dizaines de centimètres de ce matériel sont venus couvrir les sédiments contaminés du fjord. Malgré des dommages évalués à plus de $2 milliards (CAN$) sur le bassin versant, il a été proposé que le dépôt de sédiments post-glaciaires servirait à immobiliser les contaminants associés aux sédiments indigènes.

La distribution verticale et les concentrations du Fe, Mn, As et Hg ont été mesurées dans les eaux porales et sédiments récoltés à chaque année depuis la crue, à l'aide des carottiers-boite, le long de l'axe principal du fjord et de la Baie des Ha! Ha!. Les analyses de la série temporelle révèlent que la remobilisation du Mn n'a pas été affectée par l'accumulation du dépôt de crue. Les oxihydroxides de manganèse authigènes présents à l'interface eau-sédiment originale et dans le dépôt de crue furent réduits et le Mn(II) a diffusé librement vers la nouvelle interface où il fut oxidé et précipité. En contrepartie, la majorité du fer associé aux oxihydroxides authigènes qui se trouvait à l'interface originale a été piégé sous forme de sulfures sous les conditions sulfo-réductrices qui se sont rapidement établies. La plupart de l'arsenic et du mercure associés aux sédiments indigènes semblent aussi être piègés avec les sulfures authigènes, limitant ainsi leur diffusion à travers le dépôt de crue.

Les facteurs qui influencent la migration des contaminants dans les sédiments du fjord du Saguenay : Analyse numérique de sensibilité

Dueri, S. and Therrien, R., Département de Géologie et génie géologique, Université Laval, Québec, QC, Canada

ASTM STP 1442

RÉSUMÉ : En juillet 1996, deux jours de pluie diluvienne ont entraîné plusieurs inondations dans la région du Saguenay. Les rivières déchargèrent alors plusieurs millions de mètres cubes de sédiments propres dans le fjord. Cette couche turbidite, composée de sédiments propres, peut se poser en barrière au déplacement des métaux lourds et des HAP à partir de la couche inférieure de sédiments contaminés vers la nouvelle interface sédiment/eau. Un modèle numérique a été conçu afin de simuler le déplacement vertical et la remobilisation des contaminants dissouts dans la couche de recouvrement. Le modèle comprend les principaux facteurs physiques, chimiques et biologiques la densité du flux du contaminant de la couche de recouvrement. Le calibrage du modèle a été réalisée par la comparaison des données cueillies durant la caractérisation sur place et en laboratoire des sédiments du fjord Saguenay. Une analyse de sensibilité approfondie, fondée sur un plan factoriel, montre que les paramètres du

modèle associés à la bio-irrigation ont le plus d'effet sur la sortie du modèle et par extension sur l'efficacité de la couche de recouvrement.

Surveillance de la provenance, de la réactivité et du temps de résidence des particules en suspension dans les milieux en transition à l'aide d'isotopes Th (234Th, 232Th, 230Th, 228Th) – Exemple du fjord du Saguenay (Québec)

Patrick Poulin, Bassam Ghaleb, Claude Hillaire-Marcel and Alfonso Mucci
GEOTOP – UQAM & McGill

RÉSUMÉ: Dans le fjord du Saguenay, la couche turbide de la pycnocline séparant la couche de surface relativement diluée, de la couche profonde, plus salée, est le lieu d'intenses processus de coagulation, d'adsorption et de désorption dans lesquels la matière particulaire en suspension (MPS) joue un rôle important. Afin de mieux comprendre la dynamique de cette MPS, la présente étude vise à: 1) déterminer sa nature organique/inorganique, sa minéralogie; 2) déterminer la composition isotopique du Th adsorbé ou inclus, afin de préciser les sources de la fraction minérale, les échanges entre les phases dissoute et particulaire et; 3) déterminer le temps de séjour de la MPS à partir des isotopes à plus courte période (^{228}Th et ^{234}Th) produits respectivement par le ^{228}Ra et ^{238}U dissous. Selon les échantillonnages, de 4 à 8 stations ont été visitées le long de l'axe principal du fjord. A chacune d'elles la MPS a été récupérée à partir d'échantillons de 300 à 600 L d'eau puisée à la hauteur de la pycnocline, après filtration tangentielle *in-situ*. Sur les trois campagnes d'échantillonnage prévues, afin d'établir l'impact des variations saisonnières sur les flux de thorium, deux ont déjà été complétées (mai 2001; septembre 2001). Les isotopes du thorium ont été analysés, selon le cas, en spectrométrie alpha ou bêta. Les analyses complémentaires effectuées incluent les rapports $C_{org.}/N_{total}$, les teneurs en ^{13}C, ^{15}N, ainsi que des analyses par diffraction X.

Les résultats démontrent que la MPS est constituée 1) d'une fraction organique associée à la production algaire et bactérienne, locale, ou d'eau douce en amont; 2) d'une fraction minérale héritée essentiellement de la province précambrienne de Grenville (migmatite). Les isotopes du thorium (^{234}Th, ^{232}Th, ^{230}Th, et ^{228}Th) indiquent tous une concentration relative croissante, de l'amont vers l'aval, et une distribution saisonnière spécifique. Les teneurs en ^{230}Th-^{232}Th croissantes sont interprétées comme un changement de taille des particules, plus fines, en aval, tandis que les augmentations des teneurs en ^{234}Th et ^{228}Th, normalisées aux précédentes, rendent compte de leur adsorption *in-situ*, donc de la réactivité des particules porteuses. En postulant une production de ^{234}Th constante, à la hauteur de la pycnocline, nous avons élaboré un modèle chronologique qui livre des temps de séjour pour la MPS de 3 jours à un maximum de trois semaines. Bien que cette approche vienne confirmer que le ^{234}Th est un outil efficace pour évaluer la durée de processus rapides, des mesures d'activité d'^{238}U et de ^{228}Ra devrons être effectuées pour la valider. La complexité de l'effet du fractionnement granulométrique qui affecte la MPS doit être mieux documentée, afin de comprendre l'implication de ce processus dans la problématique du temps de séjour de la MPS dans le fjord.

Propriétés physiques, magnétiques, sédimentologiques, géochimiques, faciès isotopiques et micropaléontologiques des couches rapidement déposées dans le fjord du Saguenay au Québec : de 7200 cal avant la couche d'inondation de1996 AD

Guillaume St-Onge[1], Guy Bilodeau[1], Anne de Vernal[1], Claude Hillaire-Marcel[1], Bassam Ghaleb[1], Julie Leduc[1], Alfonso Mucci[1], Josée Savard[1], Deke Zhang[1], Thierry Mulder[2], David Piper[3], Joseph Stoner[4]
[1] GEOTOP-UQÀM-McGill, Montréal, Qc, Canada
[2] Université de Bordeaux 1, Talence, France
[3] Geological Survey of Canada (Atlantic), Dartmouth, NS, Canada
[4] INSTAAR, University of Colorado, CO, USA

RÉSUMÉ: L'analyse des propriétés sédimentologiques, géochimiques, isotopiques et micropaléontologiques de plusieurs carottes sédimentaires ainsi que de sédiments de surface prélevés dans le fjord du Saguenay et la baie des Ha!Ha! a permis d'identifier plusieurs couches accidentelles. Les couches accidentelles les plus récentes observées dans les carottes-boîtes ont été déposées à la suite de la crue de 1996 AD, du séisme de 1988 AD et du glissement de terrain de St-Jean-Vianney en 1971 AD. Les profils de radio-isotopes à courte période (^{228}Th, ^{210}Pb and ^{137}Cs) indiquent un mélange discret, en particulier au sommet de ces couches, mais leur enfouissement semble avoir été suffisamment rapide pour qu'elles aient conservé quasi-intactes leurs signatures isotopiques. L'analyse des foraminifères prélevés dans le sédiment accumulé avant et après la crue de 1996 AD indique une recolonisation rapide des sédiments par la microfaune benthique après 1996, avec une diversité des espèces plus élevée qu'avant la crue. La couche de crue de 1996 AD semble ainsi avoir joué un rôle isolant sur les sédiments contaminés sous-jacents. Une carotte sédimentaire de 38 m de longueur prélevée dans le basin central du fjord du Saguenay a révélé la présence d'au moins 14 couches accidentelles probablement liées à des séismes de grande magnitude (>6) survenus au cours des derniers ~7200 ans dont une de ~16 m d'épaisseur qui est associée au grand séisme historique de 1663 AD.

Une ré-évaluation complète des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) dans les sédiments du fjord du Saguenay (Québec)

Émilien Pelletier, Nathalie Côté, Antonio Curtosi, Richard St-Louis
Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski
Rimouski, QC, Canada

RÉSUMÉ: L'objectif de ce travail est de fournir une nouvelle série de données sur la distribution spatio-temporelle des HAPs dans les sediments du fjord du Saguenay et de la baie des Ha!Ha! environ 15 ans après la dernière publication détaillée sur le sujet. Cinq carottes de sédiment ont été échantillonnées dans différentes sections du fjord au printemps 2002 et analysées pour leur contenu en HAPs par GC/MS. Les HAPs totaux (une sélection de 16 HAPs prioritaires) sont présentés pour les 28 premiers cm de chaque carotte. La concentration moyenne dans la couche de surface (0.0-0.5 cm) était de 310 ng/g (poids sec) avec une valeur maximale de 460 ng/g trouvée pour la carotte 5 dans le Bras Nord du fjord et une valeur minimale de 227 ng/g dans la baie des Ha!Ha!. Les valeurs de surface rapportées ici sont entre 10 et 30 fois inférieures aux valeurs rapportées pour des carottes prélevées en 1982 (Martel et al. 1987). Toutes les carottes montrent des valeurs maximales en HAPs à des profondeurs variant entre 15 et 28 cm montrant

le lent processus d'enfouissement des sédiments hautement contaminés apportés au fjord dans les années 1960 et 1970.

Une extraction sélective des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) des sédiments contaminés à l'aide d'un agent de surface de forte masse moléculaire

Mickaël Barthe, Émilien Pelletier
Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski
Rimouski, QC, Canada

RÉSUMÉ: L'objectif du projet était de développer une méthode d'extraction sélective des HAP pouvant mimer l'action digestive des microorganismes et des invertébrés benthiques et contribuer à comprendre l'influence de la séquestration chimique sur la biodisponibilité et la toxicité des composés organiques présents dans les sédiments marins. Des tests préliminaires pour déterminer la sélectivité et l'efficacité d'une série de tensioactifs nous ont conduits à choisir l'éther stéaryle de polyoxyéthylène(100) (Brij® 700) avec une concentration optimale de 5.25×10^{-3} M. Les résultats obtenus avec le Brij® 700 montrent que le développement d'une méthode d'extraction sélective des HAP utilisant un tensioactif synthétique de haut poids moléculaire présentant des similitudes avec les tensioactifs naturels produits par les communautés microbiennes peut procurer des données pertinentes pouvant être reliées à un mécanisme de séquestration. Notre protocole a été testé avec 17 échantillons provenant du fjord du Saguenay). De manière générale, les HAP de haut poids moléculaire étaient moins extraits par le Brij® 700 que ceux de faible poids moléculaire.

Cinétique et mécanismes de séquestration des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) en eau douce et en dépôt marin

Denis Brion, Émilien Pelletier
Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski
Rimouski, QC, Canada

RÉSUMÉ: Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) sont connus pour leur persistance dans les sédiments lacustres et marins. Un mécanisme de vieillissement souvent appelé séquestration est responsable du changement de biodisponibilité des HAPs et est attribué à une lente migration des molécules aromatiques dans la matière organique condensée et des microsites inaccessibles. Pour étudier la vitesse de séquestration des HAPs sous des conditions de laboratoire, nous avons ajouté des HAP marqués, [^{2}H]-HAPs, à des échantillons de sédiment naturel que nous avons ensuite périodiquement ré-extrait avec une solution aqueuse d'un tensio-actif de haut poids moléculaire (Brij® 700) afin d'estimer la proportion des HAPs non séquestrés. Les molécules adsorbées se sont lentement séquestrées dans des microsites inaccessibles et de plus en plus difficile à extraire. Un modèle mathématique a été développé pour quantifier les constantes de vitesse du mécanisme de séquestration. Le modèle est basé sur un système dynamique à trois compartiments dans lequel les composés aromatiques sont pris en charge et ensuite séquestrés par le matériel particulaire compte tenu des conditions expérimentales et de notre connaissance du processus diffusif, le système à 3 compartiments a été simplifié à une

réaction de premier ordre à deux étapes consécutives et irréversibles. La vitesse moyenne de séquestration, k_2, est dix fois plus lente que la vitesse d'adsorption initiale, k_1.

Session d'affiches

Comportement des HAP de fortes masses moléculaires dans la nouvelle couche de sédiments de la Baie des Ha! Ha! (Fjord du Saguenay)

Émilien Pelletier, Isabelle Desbiens
Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski
Rimouski, QC, Canada

RÉSUMÉ : Une série de quatre carottes de sédiment a été échantillonnée entre 1998 et 2002 au centre de la Baie des Ha ! Ha ! afin de déterminer le comportement de quelques hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) de haut poids moléculaire déposés immédiatement après le déluge de juillet 1996. Les échantillons secs ont été extraits au dichloro-méthane (DCM) et ensuite analysés par chromatographie liquide (HPLC-Fluorescence). Le benzo(a)pyrène (BaP) a été retenu comme le meilleur marqueur du processus de mélange avec la couche sous-jacente. Les résultats montrent un enfouissement progressif du BaP et une homogénéisation de la couche entre 0-12 cm au cours des 4 années d'observation. Étant donné la très faible solubilité du BaP, sa faible biodégradabilité par les microorganismes et sa liaison préférentielle avec la matière organique, nous considérons que le BaP est un bon marqueur pour le calcul de l'enfouissement du carbone organique dans une couche sédimentaire à partir d'une récente sédimentation en surface.

Contributions du projet Saguenay Post-Deluge à la conception des couches de recouvrement

Hélène Tremblay et Jacques Locat
Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, QC, Canada

RÉSUMÉ : Le recouvrement *in situ* des sédiments contaminés est une méthode qui consiste à déposer sous l'eau une couche de sédiments ou autre matériau, sur des sédiments contaminés dans le but de protéger l'environnement des effets toxiques des contaminants. L'expérience a démontré que parmi les méthodes de traitement possibles, le recouvrement à l'aide de matériaux propres, pratiqué depuis la fin des années 70, est une des plus économiques. Cependant, certains aspects de la conception présentent des lacunes dont plusieurs ont été comblées dans le cadre du projet Saguenay Post-Déluge, où les chercheurs ont mis au point des méthodologies et modèles pour aider à la conception des couches de recouvrement. Les éléments du design développés dans le cadre du projet Saguenay Post-Déluge sont : 1) l'évaluation de la profondeur de bioturbation, 2) le développement d'un modèle diagénétique, 3) le développement d'un modèle de transfert des contaminants à travers la couche qui tient compte de la bioturbation, 4) le développement d'un modèle de consolidation qui tient compte de la bioturbation, 5) la détermination de l'intégrité de la couche de recouvrement et de l'évolution de la recolonisation et 6) l'analyse décisionnelle. Cet article présente non seulement ces différents éléments mais également une revue de la littérature en ce qui concerne ces différents aspects de la conception.